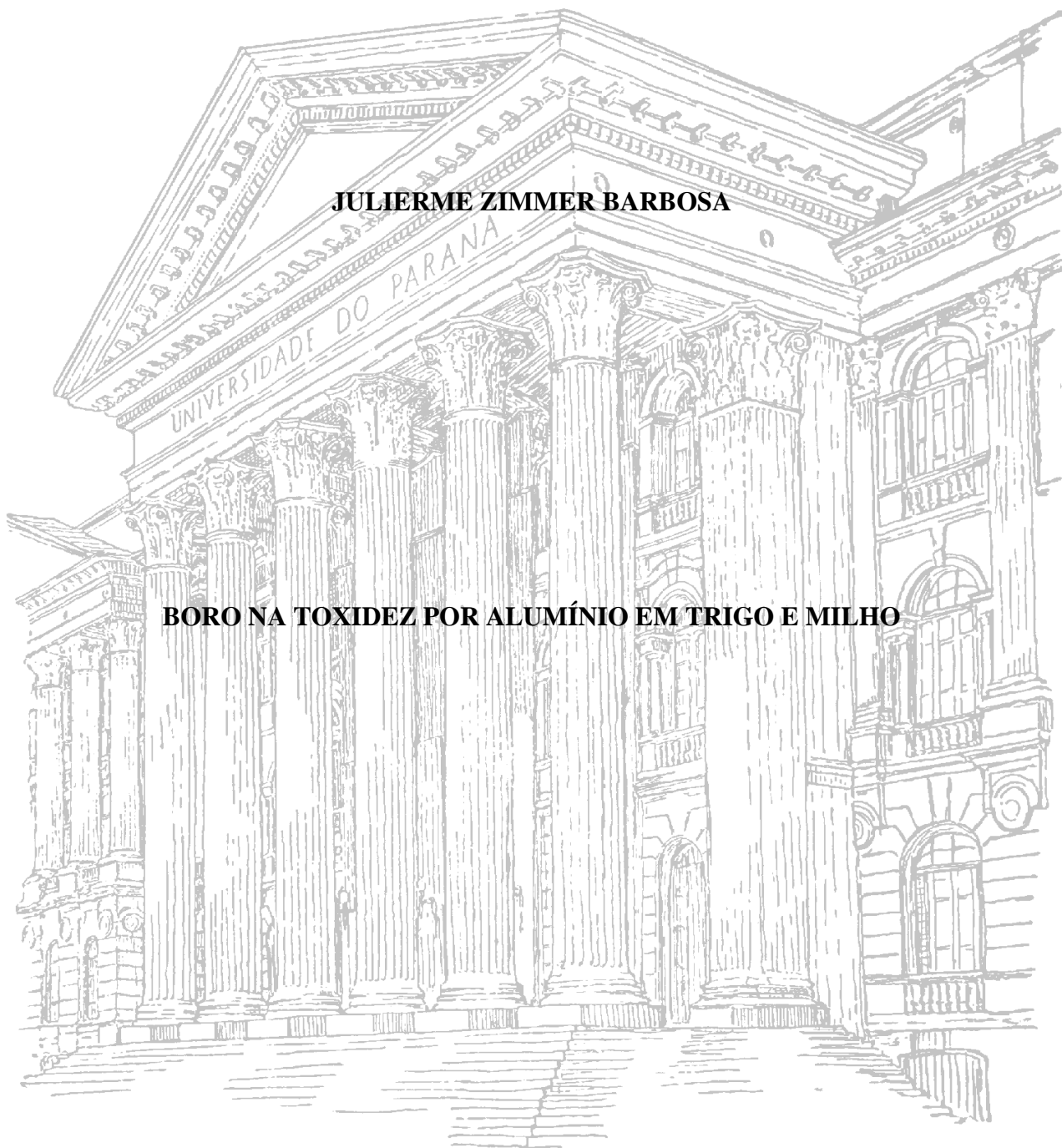


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JULIERME ZIMMER BARBOSA

BORO NA TOXIDEZ POR ALUMÍNIO EM TRIGO E MILHO



CURITIBA

2013

JULIERME ZIMMER BARBOSA

BORO NA TOXIDEZ POR ALUMÍNIO EM TRIGO E MILHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Solo e Ambiente, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Vargas Motta

CURITIBA

2013

B238 Barbosa, Julierme Zimmer
Boro na toxidez por alumínio em trigo e milho. Julierme Zimmer
Barbosa. / Curitiba: 2013.
100 f. il.

Orientador: Antônio Carlos Vargas Motta
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná.
Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação
em Ciência do Solo.

1. Plantas - Efeito do alumínio. 2. Solos ácidos. 3. Nutrição de
plantas. I. Motta, Antônio Carlos Vargas. II. Universidade Federal
do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo. III. Título.

CDU 631.415.2:631.8



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM CIÊNCIA DO SOLO

PARECER

A Banca Examinadora designada para avaliar a defesa da Dissertação de Mestrado de **JULIERME ZIMMER BARBOSA**, intitulada “**Boro na toxidez de alumínio em milho e trigo**”, do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após análise do texto e arguição do candidato, emitem parecer pela “**APROVAÇÃO**” da referida Dissertação. O candidato atende assim um dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração Solo e Ambiente**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 28 de fevereiro de 2013.

Prof. Dr. Antonio Carlos Vargas Motta, Presidente.


Prof. Dr. Milton Ferreira de Moraes, I°. Examinador.


Prof. Dr. Marcelo Marques Lopes Muller, II°. Examinador

Aos meus avôs Ivo José Zimmer (*in memoriam*) e Pedro Barbosa.
Às minhas avós Gervazia Zimmer e Ramona Barbosa (*in memoriam*).
À minha mãe Elaine Ines Zimmer.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade de realizar este trabalho e ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao meu orientador, Prof^o Antonio Carlos Vargas Motta pela orientação e ajuda no trabalho e pelos ensinamentos de Ciência do Solo. Ainda, pela amizade, paciência e pela transmissão de valiosos conhecimentos acerca da condição humana.

Aos professores do Programa com os quais tive o privilégio de aprender e pelo auxílio em alguma etapa deste trabalho, principalmente aos Professores Volnei Pauletti, Fabiane M. Vezzani e Bruno Reissmann.

Aos professores que participaram da banca, Marcelo Marques Lopes Muller e Milton Ferreira de Moraes, que tanto puderam contribuir com a finalização deste trabalho.

Ao meu amigo e colega de mestrado Rangel Consalter, que muito me ajudou nos experimentos e com o qual sempre aprendo algo.

A todos os meus colegas e amigos que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho: Araina H. Batista, Daniel Kramer, Fernanda “da gema”, Giovana Poggere, Jéssica F. Kaseker, Kharyn F. Fezer, Letícia de Pierri, Marília C. Bastos, Raul M. Cezar, Rebert Skalisz, Rodrigo W. Silva, Uilson “rondônia”, Veridiana F. Cherobim e Wilson W. R. Teixeira.

Aos laboratoristas Roberto, Aldair, Maria do departamento de Solos e, Maria Emília do departamento de Fitotecnia, pelo auxílio nas análises, e ao Gerson da secretaria da pós graduação.

Aos meus familiares, em especial minha mãe Elaine, meu tio Jair, minha madrinha Gasparina e minha avó Gervazia pelo suporte, força e incentivo.

Aos meus orientadores de graduação em Agronomia, Alfredo Castamann e Márcio Luis Vieira.

E a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL	1
LITERATURA CITADA.....	3
CAPÍTULO 2 – COMPORTAMENTO DO TRIGO EM RESPOSTA A DOSES DE BORO E NÍVEIS DE ACIDEZ DO SOLO.....	7
RESUMO	7
CHAPTER 2 – WHEAT BEHAVIOR IN RESPONSE TO LEVELS OF BORON AND SOIL ACIDITY LEVELS	8
ABSTRACT.....	8
1 INTRODUÇÃO	9
2 MATERIAL E MÉTODOS	10
2.1 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....	10
2.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA	13
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
3.1 BORO NO SOLO E ASPECTOS VISUAIS DE TRIGO.....	13
3.2 PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA E TRANSPIRAÇÃO	17
3.3 ATRIBUTOS RADICULARES	19
3.4 QUÍMICA DO SOLO RIZOSFÉRICO E NÃO RIZOSFÉRICO.....	24
3.5 ESTADO NUTRICIONAL E TEOR DE ALUMÍNIO	30
4 CONCLUSÃO	44
5 LITERATURA CITADA.....	44
CAPÍTULO 3 – INTERAÇÃO B/AL EM MILHO: IMPACTO SOBRE ATRIBUTOS BIOMÉTRICOS, AQUISIÇÃO DE NUTRIENTES, SENSIBILIDADE DE MÉTODOS DE ANÁLISE DE CTC RADICULAR E ANÁLISE FOLIAR	51
RESUMO	51
CHAPTER 3 – INTERACTION B/Al ON MAIZE: IMPACT ON BIOMETRIC ATTRIBUTES, NUTRIENTS ACQUISITION, METHODS SENSIBILITY FOR ROOT CATION EXCHANGE CAPACITY AND LEAF ANALYSIS	52
ABSTRACT.....	52
1 INTRODUÇÃO	53
2.1 CONDUÇÃO EXPERIMENTAL.....	56

2.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA	59
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
3.1 ASPECTOS VISUAIS, PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA E TRANSPIRAÇÃO.....	59
3.2 ATRIBUTOS RADICULARES E MÉTODOS DE ANÁLISE DE CTC DA RAIZ	62
3.3 DEPLEÇÃO DE NUTRIENTES DA SOLUÇÃO NUTRITIVA.....	68
3.4 VARIÁVEIS DE ANÁLISE FOLIAR.....	73
4 CONCLUSÃO	81
5 LITERATURA CITADA.....	82
CONSIDERAÇÕES FINAIS	90

BORO NA TOXIDEZ POR ALUMÍNIO EM TRIGO E MILHO ¹

Autor: Julierme Zimmer Barbosa

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Vargas Motta

RESUMO GERAL

A toxidez por alumínio (Al) é um dos principais fatores de limitação do desempenho das culturas agrícolas em solos muito ácidos, sendo que este afeta o metabolismo e o crescimento das plantas. Contudo, os danos provocados pela toxidez por Al variam em função do estado nutricional da planta. O micronutriente boro (B) tem se mostrado importante na amenização da toxidez por Al, demonstrando existir certa interação B/Al. Nesse prisma, o presente trabalho teve por objetivo geral avaliar o efeito do B na toxidez por Al em plantas de trigo (*Triticum aestivum* L.) e milho (*Zea mays* L.). Para tanto, foram realizados dois experimentos em condição de casa de vegetação, um usando solo (trigo) e outro usando hidroponia (milho). O trigo foi cultivado até a emissão da inflorescência em três condições de solo: baixa acidez, alta acidez e tratamento com gesso. Para cada condição, aplicaram-se cinco doses de B (0; 0,15; 0,40; 1,25 e 3,50 mg dm⁻³). Já no cultivo hidropônico, plântulas com três dias foram transplantadas para hidroponia, onde foram cultivadas por 14 dias. Foram avaliados seis tratamentos na solução nutritiva (3 x 2): três níveis de B (0, 50 e 200 µM) e dois de Al (0 e 300 µM). Os tratamentos de acidez do solo Gessagem e Alta acidez foram prejudiciais para a produção de trigo, em comparação ao tratamento Baixa acidez. Assim, destaca-se a condição de gessagem, onde ocorreu desbalanceamento do estado nutricional pelo grande aumento de disponibilidade de Ca, o que diminuiu o acúmulo de matéria seca. Já a aplicação de B apresentou tanto efeito promotor quanto tóxico à produção de matéria seca pelo trigo, sendo o efeito promotor percebido claramente na condição de gessagem. As variações no estado nutricional das plantas em resposta a aplicação de B foram pouco pronunciadas que em relação aos níveis de acidez, contudo, o B reduziu os teores de Al na fração caule + folha. Em hidroponia, a condição de toxidez por Al depreciou a produção de matéria seca, sistema radicular, a aquisição de nutrientes e o metabolismo do milho, contudo, o B não amenizou estes sintomas. Tanto a adição de B como de Al diminuíram a capacidade de troca de cátions radicular. A adição de B aumenta a concentração de clorofilas enquanto o Al reduz. Em geral, o B amenizou alguns dos efeitos negativos observados sobre as plantas que cresceram em solo muito ácido e em hidroponia com elevada concentração de Al.

Palavras-chave: solos muito ácidos, nutrição de plantas, hidroponia, capacidade de troca de cátions da raiz.

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. (91 p.) Fevereiro, 2013.

BORON ON ALUMINIUM TOXICITY IN WHEAT AND CORN ²

Author: Julierme Zimmer Barbosa

Advisor: Prof. Dr. Antonio Carlos Vargas Motta

GENERAL ABSTRACT

The aluminum (Al) toxicity has been recognize as major limiting factor to the performance of agricultural crops in very acid soils, affecting plant metabolism and growth. However, the Al damage to plant can vary as result of plant state nutritional. The micronutrient boron (B) has been shown to interact with Al, alleviating its toxicity. In this perspective, the present research aimed to evaluate the B nutrition on Al toxicity for wheat (*Triticum aestivum* L.) and maize (*Zea mays* L.). Therefore, two experiments were conducted under greenhouse condition, one using soil (wheat) and the other hydroponic (maize). Wheat was grown until whole inflorescences emission under three soil conditions: low acidity, high acidity and treated with gypsum. For which soil condition, five rates of B (0, 0.15, 0.40, 1.25 and 3.50 mg dm⁻³) were applied before sowing. Three-days maize seedling was transplanted and grown for 14 days in hydroponic. Six treatments (3 x 2) were tested for nutritive solution: three B rates (0, 50 and 200 µM) and two Al rates (0, 300 µM). High acidity and gypsum conditions were detrimental to wheat yield, compared to treatment with low acidity. Gypsum provided large increment on Ca availability which resulted nutritional imbalance, diminishing dry matter yield. Boron application enhanced wheat dry matter for the lowest rate and decreased for the highest rate only when gypsum was applied. It seems that B application reduced Al toxicity since its concentration decreased in stem + leaf fraction when B was applied. In general, the soil acidity conditions showed to more influence on wheat nutritional state than B addition. Under hydroponic, Al had negative impact on aboveground maize dry matter, roots system, nutrient acquisition and metabolism. These effects were not mitigate by B application. Similar behavior was observed for B and Al on root cation exchange capacity, by reducing its values. However, B increased chlorophyll when Al decreased its concentration. In general, there is indication that B alleviated negative effect resulted of plant growth under very acid of soil and hydroponic with high Al concentration.

Key-Words: very acid soils, plant nutrition, hydroponic, root cation exchange capacity.

² Soil Science Master Dissertation. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. (91 p.) February, 2013.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL

Em decorrência do material de origem e da intensidade de ação dos agentes do intemperismo, os solos podem ser ácidos (von Uexküll & Mutert, 1995; Motta & Melo, 2009). Por definição, solos ácidos apresentam pH inferior a 7, porém, grande parte da solum-esfera apresenta acidez elevada (pH inferior a 5,0). Essa condição associada à: alta acidez trocável (para solos minerais, se considera o teor de alumínio (Al) trocável – Al^{3+} , principal fator problemático em solos ácidos), alto teor de manganês (Mn), reduzidos teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e fósforo (P) constituem os fatores que potencialmente limitam a agricultura em solos ácidos (George et al., 2012). Entretanto, a maioria das espécies vegetais utilizadas agricolamente não atinge o máximo potencial produtivo quando cultivadas em solos com elevada acidez, seja pela toxidez iônica (Al e Mn) ou pela carência nutricional (Cifu et al., 2004; Valle et al., 2009).

Não obstante, nesse ponto é necessário salientar a particularidade de dois grupos de solos ácidos onde o Al é pouco problemático, os oxídicos e os orgânicos. No primeiro grupo, os solos são altamente intemperizados e apresentam baixos valores de pH, porém, em geral tem efeito negativo sobre plantas cultivadas em função da pobreza do macronutriente Ca, e não na toxidez por Al. Isso decorre da ínfima acidez trocável, uma vez que nestes solos o Al é majoritariamente encontrado precipitado na estrutura de minerais insolúveis (Alleoni et al., 2009). Já o segundo grupo, os solos podem apresentar pH extremamente reduzido, porém, a alta quantidade de matéria orgânica reage de forma a complexar o Al livre (Motta & Melo, 2009).

Para o cultivo eficiente de espécies sensíveis à elevada acidez do solo, em geral, melhora-se a fertilidade do solo e/ou a genética vegetal. No caso da fertilidade, materiais são utilizados, os quais podem elevar o pH do solo e fornecer nutrientes (cinzas, rocha ou conchas moídas, resíduos orgânicos, lama cal, escórias, *et cetera*) ou somente fornecer nutrientes (fertilizantes) (CQFSRS/SC, 2004; Sousa et al., 2007). O material corretivo mais utilizado na agricultura brasileira é o calcário (rocha calcária ou conchas moídas), o que se deve a eficiência e ao baixo custo.

Em curto prazo, o efeito da aplicação de calcário na superfície do solo não se estende no perfil como um todo, e sim, de maneira concentrada na camada superficial (0-20 cm) (Sousa et al., 2007). O gradiente de acidez superfície/sub-superfície pode limitar o crescimento radicular, com menor exploração de camadas mais profundas. Em condição de

seca, espera-se que a importância de um sistema radicular mais profundo aumente, já que a umidade é maior na camada sub-superficial. Esse fato se comprovou eficiente, por exemplo, quando da constatação do efeito do sulfato de Ca ou gesso (presente no fertilizante super fosfato simples - fonte de P) sobre o crescimento de raízes em solo da região do Cerrado durante período de deficiência hídrica (Lopes & Guilherme, 2007). Desde então e em razão do acúmulo de gesso como resíduo da indústria de fertilizantes fosfatados, este material vem sendo utilizado no país como condicionador de solos ácidos e solos afetados por salinidade (Sousa et al., 2007; Freire & Freire, 2007). Apesar disso, em solos onde o Al trocável é elevado, ao contrário de grande parte dos solos (oxídicos) do Cerrado, o aumento de Ca em profundidade não acompanhado por alteração no pH (efeito do gesso em solos) pode não ter a mesma eficiência. Em adição, com o excesso de gesso sem aumento no teor de outros cátions (Mg e K) no sistema solo é passível de que a melhoria esperada não seja alcançada, em razão da competição na absorção catiônica.

No caso da genética vegetal, se utiliza a via biotecnológica, através do cruzamento de genótipos com sensibilidade/tolerância divergente (Camargo, 1984; Camargo et al., 2008). Os mecanismos relacionados à tolerância são bastante diversos entre espécies vegetais, todavia, em linhas gerais podem ser destacados: alterações na rizosfera, alcalinização e exsudação de ácidos orgânicos; menor capacidade de troca de cátions no tecido radicular; compartimentalização interna ou exclusão de elementos tóxicos (Poschenrieder et al., 2008).

Em paralelo, o boro (B) é um micronutriente para as plantas que, em alguma medida, pode promover a produção vegetal em solo ácido (Lenoble et al., 1996) e, especificamente, na presença de Al^{3+} (Hossain et al., 2004). No solo, conforme Goldberg (1997), o B encontra-se na estrutura de minerais de baixa (turmalina) e alta solubilidade, sendo que na solução do solo é encontrado sob a forma de ácido bórico $[B(OH)_3]$ (carga eletroquímica nula) ou do ânion borato $[B(OH)_4^-]$. Os principais atributos do solo que estão correlacionados com a adsorção à fase sólida são pH, textura e matéria orgânica. Na faixa de pH em que a maioria dos solos ácidos são explorados (5,5-6,5) está adsorção é menor, pelo predomínio da forma química $B(OH)_3$. Por este fato, o B é um elemento passível de lixiviação em regiões de alta precipitação pluviométrica, sobretudo em solos mais arenosos (Goldberg, 1997; Motta et al., 2007). Em detrimento de seu comportamento, o B aplicado via fertilizante tem efeito residual baixo quando comparado com Zn e Cu, que apresentam forte interação com a fase sólida (Abreu et al., 2007). Em suma, a carência de B pode ser um fator adicional de limitação à

produção vegetal em solos ácidos. Assim, torna-se importante a avaliação constante dos níveis de B no solo, para que quando necessário este seja aplicado via fertilização.

Uma particularidade do B, de acordo com Abreu et al. (2007), em comparação aos demais nutrientes, é o intervalo entre o nível suficiente e o nível tóxico mais estreito, portanto, com o intuito de sanar a limitação pode-se – por erro na recomendação técnica ou na regulação do equipamento de aplicação –, criar outra limitação, a toxidez.

A toxidez alumínica e a deficiência de B apresentam sintomas semelhantes nas raízes, de maneira que ambos afetam negativamente as funções da parede celular, reduzindo o crescimento radicular e a capacidade de aquisição de água e nutrientes pela planta (Moraes-Dallaqua et al., 2000; Poschenrieder et al., 2008). Em razão da semelhança sintomatológica, estudos têm sido realizados para avaliar a interação B/Al em meios de cultivo ácido, sendo que a amenização da toxidez por Al pela ação do B foi constatada em alguns (Lenoble et al., 1996; Stass et al., 2007; Yu et al., 2009), enquanto outros trabalhos não tem verificado está relação (Taylor & Macfie, 1994; Wang, 2004). Nesse cenário contraditório, torna-se importante compreender a interação B/Al em condições de cultivo ácido, priorizando a investigação de um potencial efeito do B sobre atributos vegetais relacionados a maior tolerância ao Al, como aqueles destacados por Poschenrieder et al. (2008), como alterações rizosféricas e de troca catiônica radicular. Não obstante, alterações no metabolismo da parte aérea também podem fornecer subsídios para tal compreensão (Tang et al., 2011).

LITERATURA CITADA

ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. C. G. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (eds.). Fertilidade do solo. Viçosa, SBCS, 2007. p. 645-736.

ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A.; CASAGRANDE, J. C.; SOARES, M. R. Química dos solos altamente intemperizados. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. eds. Química e mineralogia do solo, n. 2. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2009. p. 381-448.

BARBOSA, J. Z.; CASTAMANN, A. Doses de boro e a produção de girassol. In: FertBio 2008. Anais. Londrina, SBCS/IAPAR/UEL. 2008. CD-ROM

BEN-GAL, A.; SHANI, U. Yield, transpiration and growth of tomatoes under combined excess boron and salinity. Plant Soil, 247:211-221, 2002.

CAMARGO, C. E. O. Melhoramento do trigo. VI. Hereditariedade da tolerância a três concentrações de alumínio em solução nutritiva. *Bragantia*, 43:279-291, 1984.

CAMARGO, C. E. O.; FERREIRA FILHO, A. W. P.; FELICIO, J. C.; GALLO, P. B.; LOBATO, M. T. V.; BIUDES, G. B. Desempenho de linhagens de trigo, oriundas de hibridações, em duas condições de cultivo do estado de São Paulo e tolerância à toxicidade de alumínio em laboratório. *Bragantia*, 67:613-625, 2008.

CIFU, M.; XIAONAN, L.; ZHIHONG, C.; ZHENGYI, H.; WANZHU, M. Long-term effects of lime application on soil acidity and crop yields on a red soil in Central Zhejiang. *Plant and Soil*, 265:101-109, 2004.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFSRS/SC. Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10.ed. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul. 2004. 400p.

CORRÊA, J. C.; COSTA, A. M.; CRUSCIOL, C. A. C.; MAUAD, M. Doses de boro e crescimento radicular e da parte aérea de cultivares de arroz de terras altas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30:1077-1082, 2006.

FAGERIA, N. K. Níveis adequados e tóxicos de boro na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de Cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 4:57-62, 2000.

FREIRE, M. B. G. S.; FREIRE, F. J. Fertilidade do solo e seu manejo em solos afetados por sais. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (eds). Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 929-954, 2007.

GEORGE, E.; HORST, W. J.; NEUMANN, E. Adaptation of plants to adverse chemical soil conditions. In: In: MARSCHNER, P. (ed.). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Ed. 3. Elsevier, 2012, p. 409-472.

GOLDBERG, S. Reactions of boron with soils. *Plant and Soil*, 193:35-48, 1997.

HOSSAIN, A. K. M. Z.; HOSSAIN, M. A.; KOYAMA, H.; HARA, T. Effects of aluminum and boron supply on growth of seedlings among 15 cultivars of wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in Bangladesh. *Soil Science & Plant Nutrition*, 50:189-195, 2004.

LENOBLE, M. E.; BLEVINS, D. G.; MILES, R. J. Prevention of aluminum toxicity with supplemental boron. II. Stimulation of root growth in acidic, high aluminum subsoil. *Plant, Cell and Environment*, 19:1143-1148, 1996.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (eds). Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 2-64, 2007.

MORAES-DALLAQUA, M. A.; BELTRATI, C. M.; RODRIGUES, J. D. Anatomia de ápices radiculares de feijão cv. Carioca submetidos a níveis de boro em solução nutritiva. *Scientia Agricola*, 57:425-430, 2000.

MOTTA, A. C. V.; MELO, V. F. Química dos solos ácidos. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (eds). Química e mineralogia do solo, parte 2. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2009. cap. 17, p. 313-380.

POSCHENRIEDER, C.; GUNSE, B.; CORRALES, I.; BARCELÓ, J. A glance into aluminum toxicity and resistance in plants. *Science of the total Environment*, 400:356-368, 2008.

SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (eds). Fertilidade do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 206-268, 2007.

STASS, A.; KOTUR, Z.; HORST, W. J. Effect of boron on the expression of aluminium toxicity in *Phaseolus vulgaris*. *Physiologia Plantarum*, 131:283-290, 2007.

TANG, N.; JIANG, H. X.; YANG, L. T.; LI, Q.; YANG, G. H.; CHEN, L. S. Boron-aluminum interactions affect organic acid metabolism more in leaves than in roots of *Citrus grandis* seedlings. *Biologia Plantarum*, 55:681-688, 2011.

TAYLOR, G. J.; MACFIE, S. M. Modeling the potential for boron amelioration of aluminum toxicity using the Weibull function. *Canadian Journal of Botany*, 72:1187-1196, 1994.

VALLE, S. R.; CARRASCO, J.; PINOCHET, D.; CALDERINI, D. F. Grain yield, above-ground and root biomass of Al-tolerant and Al-sensitive wheat cultivars under different soil aluminum concentrations at field conditions. *Plant and Soil*, 318:299-310, 2009.

von UEXKÜLL, H. R.; MUTERT, E. Global extent, development and economic impact of acid soils. *Plant and Soil*, 171:1-15, 1995.

WANG, Y. The role of silicon, boron and pH-dependent aluminium speciation in solution on aluminum toxicity in maize (*Zea mays* L.). University Hannover, Germany. 101 p. 2004. (Doctoral thesis).

YU, M.; SHEN, R.; XIAO, H.; XU, M.; WANG, H.; WANG, H.; ZENG, Q.; BIAN, J. Boron alleviates aluminum toxicity in pea (*Pisum sativum*). Plant Soil, 314:87-98, 2009.

CAPÍTULO 2 – COMPORTAMENTO DO TRIGO EM RESPOSTA A DOSES DE BORO E NÍVEIS DE ACIDEZ DO SOLO

RESUMO

Tanto a toxidez por alumínio (Al) quanto a deficiência de boro (B) são relatados em condições de cultivo agrícola em solos muito ácidos. Além disso, é bem conhecido que ambos os elementos afetam o crescimento radicular, sendo semelhante o efeito da deficiência de B e da toxidez por Al. Em adição, têm sido reportado que o B interage com o Al, reduzindo sua toxidez. Contudo, existem dúvidas quanto a efetividade do B em amenizar a toxidez por Al. Nessa ótica, este experimento teve como objetivo de avaliar o efeito do B em um solo muito ácido cultivado com trigo (*Triticum aestivum* L.). Foi coletado um Latossolo Vermelho-Amarelo como substrato, o qual foi tratado de maneira a obter três tratamentos de acidez (baixa acidez – alta dose de calcário, alta acidez – baixa dose de calcário, e gesso). Em cada tratamento foi aplicado cinco doses de B (0; 0,15; 0,40; 1,25 e 3,50 mg dm⁻³), totalizando 15 tratamentos. Foi cultivado trigo, em vasos com 10 dm³, até a emissão total das inflorescências. Nas plantas de avaliou: produção de matéria seca, sistema radicular (comprimento, área, volume e capacidade de troca de cátions – CTC), transpiração e teor de nutrientes nos tecidos. Amostras de solo rizosférico e da matriz foram analisados quanto ao pH, bases trocáveis (Ca, Mg e K), P disponível e micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu e B). Os tratamentos de acidez solo Gessagem e Alta acidez foram prejudiciais para a produção de trigo, em comparação ao tratamento com baixa acidez. Os resultados indicam que a condição com aplicação de gesso, o trigo apresentou altos níveis de Al, K, Mn e Zn, e baixos níveis de Mg e P o que pode ter ocasionado a baixa produção. Já a aplicação de B apresentou tanto efeito promotor como tóxico a produção de matéria seca pelo trigo, o que foi percebido claramente na condição mais extrema de cultivo (Gessagem), confirmando a faixa estreita entre deficiência e toxidez. A transpiração das plantas teve efeito do B similar ao observado para produção. A aplicação de B não alterou a capacidade de troca de cátions radicular, entretanto, na ausência de aplicação do B, se constatou maiores valores para o atributo radicular no tratamento com correção da acidez trocável. O solo rizosférico diferiu do solo matriz para pH, P, K, Cu e Zn independente dos tratamentos. As variações no estado nutricional das plantas em resposta a aplicação de B foram menos pronunciadas que em relação aos níveis de acidez, contudo, o B reduziu os teores de Al na fração caule + folha, sugerindo efeito de amenização.

Palavras-chave: alumínio, toxidez, rizosfera, gesso, calagem.

CHAPTER 2 – WHEAT BEHAVIOR IN RESPONSE TO LEVELS OF BORON AND SOIL ACIDITY LEVELS

ABSTRACT

Aluminum (Al) toxicity and boron (B) deficiency has been reported in agricultural on very acid soils. Also, it is well established that both elements act on root growth and there are a lot similarity between Al toxicity and B deficiency for root. Additionally, it has been reported that in many situations B might interact with Al reducing its toxicity. However, there are doubt about how effective B application can be to reduced Al toxicity. Based on this evidence, a experiment was design in order to evaluate the effect of B on very acid soil over wheat growth (*Triticum aestivum* L.). A very acid Oxisol was collected and received three treatments [I - Gypsum; II - low limestone rate -High acidity; III - high limestone rate in order to eliminate Al toxicity - Low acidity). Then, for each of three treatments five B rates was applied (0, 0.15, 0.40; 1.25 and 3.50 mg dm⁻³), totalizing 15 treatments. Wheat was cultivate in 10 dm³ vase and cut at inflorescences. Plant evaluation included: dry matter yield, root (dry matter, length, area, volume, cation exchange capacity - CEC), transpiration and nutrients tissue analysis. Soil samples from rhizosphere and matrix were collect in order to be analyzer for pH, exchangeable bases (Ca, Mg and K), available P and micronutrients (Fe, Mn, Cu, Zn e B). The results indicated that lower yield was observed for Gypsum and High acidity treatments compared to low acidity. When gypsum was applied wheat tissue presented high level of Al, K, Mn and Zn and low Mg and P which might responsible for low yield. Confirming the low range between B deficiency and toxicity, it was obtained increment of yield low rate and decrease at high rate when gypsum was applied. Plant transpiration got similar result than yield when B was applied. Boron did not affect the root CEC. Opposite result was obtained for limestone application in the absence of B. Rhizosphere differed from matrix soil for pH, P, K, Cu e Zn despite of treatments. In general, B addition had low or no effect on nutrients concentration of wheat tissue. But, the Al concentration in stem + leaf reduced with B addition, suggesting a mitigation action.

Key-words: aluminium, toxicity, rhizosphere, gypsum, lime.

1 INTRODUÇÃO

Estima-se que cerca de 30-40 % dos solos (excluindo solos sob geleiras) do planeta sejam muito ácidos, sendo que nestes alguns fatores contribuem para a limitação ao crescimento de espécies sensíveis, de modo que a toxidez por Al é um dos principais (von Uexküll & Mutert, 1995). Jansen et al. (2004) aponta a ubiquidade do Al no ambiente, sendo o metal mais abundante e o terceiro elemento mais comum na crosta terrestre. Porém, para a toxidez vegetal é conhecido que o seu teor total é pouco importante, mas sim o teor biodisponível.

A disponibilidade de Al em solos ácidos é inversa ao pH, sendo que pH menor que 5,5 ocorre alta quantidade de Al na forma trocável (Valle et al., 2009). Nestas condições, inicialmente o Al é retido pelo aparato trocador de cátions das paredes celulares no tecido radicular, repercutindo em desestabilização do metabolismo celular, o qual reduz a elongação radicular e a capacidade de aquisição de água e nutrientes (Clark, 1977; Horst et al., 2010). Essa toxidez implica em impacto negativo sobre a parte aérea das plantas pelo efeito rizotóxico ou, ainda, por atingir órgãos aéreos e prejudicar o metabolismo destes (Jiang et al., 2009). Por fim, salienta-se que em solos ácidos o cultivo pode ser limitado por excesso de outros elementos, como Mn e Fe.

Em espécies nativas de solos ácidos, ou em determinados cultivares de espécies sensíveis, diferentes vias de tolerância à toxidez alumínica têm sido observados e estudados (Cumming & Ning, 2003; Jansen et al., 2004; Poschenrieder et al., 2008; Horst et al., 2010; Arroyave et al., 2011). Entre estas se destacam: redução da biodisponibilidade na rizosfera, através da exsudação de compostos alcalinizantes ou moléculas orgânicas com capacidade de complexação metálica; liberação de células periféricas na rizosfera; menor retenção nas paredes celulares, em resposta a menor capacidade de troca de cátions (CTC); menor permeabilidade da membrana plasmática e maior efluxo celular; compartimentalização nos vacúolos; formação de quelatos com moléculas orgânicas inter e intracelularmente; atividade enzimática elevada; associação com micorrizas.

Paralelamente, em solos ácidos localizados em regiões úmidas, como grande parte dos solos tropicais, a deficiência do micronutriente B é incidente, sobretudo pela sua intensa lixiviação (Bell, 1997; Motta et al., 2007). A carência afeta a funcionalidade da parede celular, o que prejudica a divisão celular nos tecidos vegetais (raízes, folhas, caules, flores, frutos) (Broadley et al., 2012), sendo que em relação as raízes, provoca redução da elongação.

Entretanto, se por um lado, conforme Goldberg (1997), “compared with other nutrient elements, the chemistry of B in soils is very simple. Boron does not undergo oxidation-reduction reactions or volatilisation reactions in soils”, de outro lado, o manejo da adubação não é tão simples. Isso decorre da associação dos seguintes fatores: (I) na faixa de pH em que a maioria dos solos ácidos são explorados (5,0-6,5 na camada de 0-20 cm) a adsorção do B no solo é baixa em comparação a nutrientes como P, Ca, Mg, Fe, Zn, Cu e Ni, o que se deve ao predomínio da forma química $B(OH)_3$ (ácido bórico). Essa forma tem carga nula e é passível de lixiviação, principalmente em condição de solo arenoso e alta infiltração de água (precipitação; irrigação). Em adição, o B aplicado via fertilizante tem efeito residual baixo (~ 2 anos) quando comparado com Zn e Cu (> 2 anos), que apresentam forte interação com a fase sólida (Abreu et al., 2007; Motta et al., 2007); (II) a deficiência de água eleva o requerimento externo de B para as plantas (Mattiello et al., 2009); (III) estreita faixa entre a concentração adequada e a concentração tóxica (Goldberg, 1997); (IV) variação de espécies utilizadas em rotação numa mesma área (Abreu et al., 2007).

Em razão da semelhança sintomatológica da toxidez alumínica e de deficiência bórica, estudos têm sido realizados para avaliar a interação B/Al em meios de cultivo ácido. De maneira que alguns estudos apontam para amenização da toxidez por Al pela adição suplementar de B (Lenoble et al., 1996; Stass et al., 2007; Yu et al., 2009), enquanto outros não suportam este fenômeno (Taylor & Macfie, 1994; Wang, 2004).

Nessa ótica, Neste estudo, este experimento teve como objetivo de avaliar o efeito do B em um solo muito ácido cultivado com trigo (*Triticum aestivum* L.), centralizando o aparato analítico em atributos produtivos, qualidade do sistema radicular, química da rizosfera, metabolismo e estado nutricional.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

O experimento foi realizado em casa de vegetação (julho-outubro/2011), no Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba.

Foi coletada uma amostra na camada de 0-20 cm de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico como substrato. No momento da coleta, o uso do solo era reflorestamento de

pinus (*Pinus* sp.) O substrato foi peneirado em malha de 4 mm e fracionado em três partes, sendo estas incubadas por 60 dias com os seguintes tratamentos: (I) 2 g kg⁻¹ de CaO/MgO (relação 1:1); (II) 0,2 g kg⁻¹ de CaO/MgO (relação 1:1); (III) 0,2 g kg⁻¹ de CaO/MgO (relação 1:1) e 3,5 g kg⁻¹ de CaSO₄.H₂O. Os materiais corretivos aplicados no tratamento I tiveram o intuito foi elevar o V para 70 %. Para o tratamento II, o intuito foi elevar o V para 20 %, já no tratamento III o intuito foi elevar ligeiramente o pH e aplicar dose de CaSO₄.H₂O equivalente a 7 toneladas ha⁻¹. Transcorrido o período de incubação cada fração do substrato foi amostrada e analisada quimicamente, com os resultados apresentados na Tabela 1. A análise química do solo foi realizada conforme Marques & Motta (2003), exceto o B, para o qual foi utilizado o método proposto por Abreu et al. (1994), contudo, substituiu-se a fonte de aquecimento do forno elétrico por banho-maria.

Tabela 1. Análise química do solo após a incubação com diferentes materiais inorgânicos

		Baixa acidez	Alta acidez	Gessagem
pH.CaCl ₂		5,6	4,2	4,3
pH SMP		6,6	5,6	5,8
Al	cmol _c dm ⁻³	0,0	0,8	0,7
H+Al	cmol _c dm ⁻³	4,8	8,6	7,9
Ca	cmol _c dm ⁻³	3,1	0,9	5,5
Mg	cmol _c dm ⁻³	1,1	0,6	0,8
K	cmol _c dm ⁻³	0,2	0,2	0,2
V	%	47,5	15,1	42,9
m	%	0,0	32	9,7
Ca/Mg		2,8	1,5	6,8
P	mg dm ⁻³	2,0	6,2	5,9
B	mg dm ⁻³	0,32	0,40	0,38
C	g dm ⁻³	13,3	11,5	8,7

pH em CaCl₂ (relação solo:solução de 1:2,5); H + Al estimado pelo pH SMP; Al (titulometria), Ca e Mg (espectrofotometria absorção atômica) extraídos com KCl 1 M; P e K extraído com Mehlich-1, determinados por colorimetria e espectrofotômetro de emissão por chama; B extraído com BaCl₂ a quente em banho-maria; C através de oxidação por dicromato.

O solo de cada tratamento recebeu 120 mg P kg⁻¹ (KH₂PO₄) e 180 mg K kg⁻¹ (KNO₃). Em seguida, cada tratamento foi fracionado em cinco partes, nas quais se aplicou 0; 0,15; 0,40; 1,25 e 3,50 mg dm⁻³ como ácido bórico, sendo que os três primeiros níveis de adição e o último, respectivamente, foram aplicados com o intuito de fornecer o nutriente numa faixa geralmente recomendada e em quantidade excessiva.

Em vasos plásticos com capacidade para 10 L, foram acondicionados 9 kg de solo dos tratamentos supracitados. A umidade do solo foi mantida próxima de 60 % da capacidade de retenção de água, para tanto, os vasos foram periodicamente pesados, com ajuste da umidade pela adição de água deionizada. Em adição, foram mantidos dois vasos sem plantas, os quais foram utilizados para obter a evaporação do solo.

Em cada vaso foi semeado sementes de trigo cultivar CD 109 (moderadamente sensível ao Al), sendo que após germinação e estabelecimento de plântulas, mantiveram-se oito plantas por vaso. Aproximadamente 15 dias após a emergência (DAE), foram aplicados 70 mg N kg⁻¹ [(NH₂)₂CO] e 30 DAE se aplicou inseticida à base de cipermetrina e clorpirifós na dosagem de 1 mL L⁻¹ (controle de lagartas). As plantas foram cultivadas até a emissão total das inflorescências, no entanto, antes da polinização (50 DAE).

A transpiração das plantas durante o período experimental foi obtida pela diferença entre os vasos com plantas (evapotranspiração) e os vasos sem plantas (evaporação).

Na colheita das plantas, cada unidade experimental foi fotografada com câmera Kodak AF 3x OAL 10,2 megapixels. As plantas foram separadas em raiz, caule + folha e inflorescência.

As raízes foram separadas do solo através do destorroamento do conjunto solo/raízes, que foi realizado sobre peneira com malha de 4 mm. Foi coletado o solo aderido as raízes (solo rizosférico) e o solo não associado as raízes (solo matriz). O solo rizosférico foi coletado através da agitação das raízes com solo aderido dentro de saco plástico. O resíduo remanescente de solo presente nas raízes foi retirado sob água corrente e o sistema radicular pertencente a três plantas foi armazenado em etanol 60 % (v/v). As raízes remanescentes foram agitadas em água deionizada, depois em HCl 0,01 mol L⁻¹ e por fim, novamente em água deionizada, e posteriormente junto com a fração caule + folha foram acondicionadas em sacos de papel e mantidas por 72 h a 65 °C em estufa com ventilação forçada de ar. Transcorrido o período, o material vegetal seco foi quantificado quanto a sua massa, em balança digital (0,001 g). A fração inflorescência foi conservada a 4 °C até a obtenção de imagens digitais, transcorridos cerca de 2 dias, o material foi mensurado quanto a massa da matéria seca conforme supradescrito para as demais frações.

As raízes armazenadas em etanol foram escaneadas e com o auxílio do programa *Winrhizo* se obteve valores dos atributos comprimento, área superficial e volume. Estas raízes foram submetidas a secagem e obtenção de massa, o que possibilitou a extrapolação dos

valores dos atributos radiculares em função do total de matéria seca de raízes nas oito plantas.

O material seco da parte aérea e da raiz foi moído em moinho tipo Wiley, sendo posteriormente submetidos à digestão conforme Martins & Reissmann (2007). Nos extratos obtidos após digestão quantificou-se Al, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu e Zn por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES) e, B (azomethina-H) e P (amarelo-vanadato) por espectrometria UV-VIS. Em adição, determinou-se a capacidade de troca de cátions (CTC) do material seco de raiz, conforme Crooke (1964).

O solo rizosférico e o solo matriz foram submetidos a análise química conforme Marques & Motta (2003), para pH-CaCl₂, K, Ca, Mg, P, Fe, Mn, Zn e Cu. Já o B foi extraído com BaCl₂ a quente, em banho-maria, e determinado por colorimetria (Azometina-H), utilizando o método proposto por Abreu et al. (1994) como base para determinação, contudo, substituiu-se a fonte de aquecimento do forno elétrico por banho-maria (5 minutos com temperatura da solução a 70 °C).

2.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) seguindo um delineamento inteiramente casualizado com esquema fatorial dos tratamentos (três condições de acidez x cinco níveis de B). Para análise dos dados foi utilizado o teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade, uma vez que se objetivou obter a discriminação qualitativa dos tratamentos avaliados. O B no solo foi submetido à análise de regressão em função do B aplicado, adotando como critério para escolha do modelo de regressão os valores de coeficiente de determinação (R^2) mais altos e o nível de probabilidade com maior significância.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 BORO NO SOLO E ASPECTOS VISUAIS DE TRIGO

A aplicação de B elevou linearmente o teor no solo, invariavelmente para todos os tratamentos de acidez (Figura 1). O tratamento com baixa acidez, apresentou maior coeficiente angular, dado provavelmente a menor disponibilização do B em função do pH mais elevado (Tabela 1), afetando principalmente as menores doses. Provavelmente, maior

adsorção ocorreu no pH maior (Goldberg, 1997), com consequente menor recuperação pelo extrator.

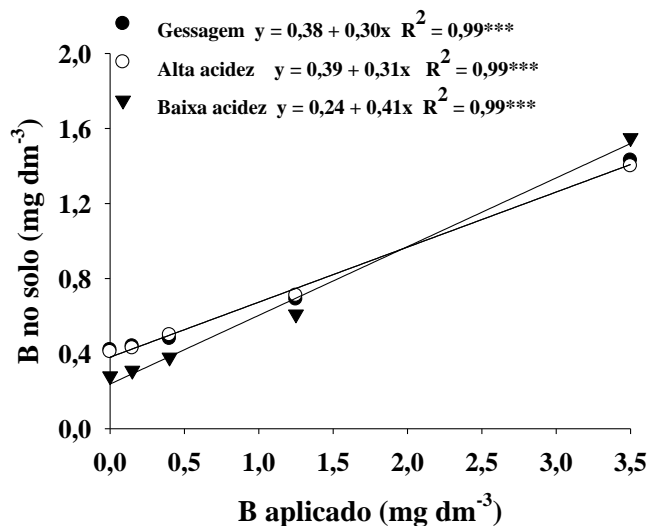


Figura 1. Correlação entre B aplicado e B no solo extraído por BaCl_2 a quente após o cultivo de trigo. *** nível de significância de 1 %.

A interação dos tratamentos de acidez do solo e da dose B proporcionou efeito variado sobre aspectos visuais da parte aérea do trigo (Figura 2). O tratamento com baixa acidez promoveu o crescimento vegetal mais abundante, o que era esperado, em razão de seu efeito sobre o pH e no teor de Ca e Mg (Tabela 1). Os tratamentos Gessagem e Alta acidez não diferiram claramente quando o B não foi aplicado e na dose de $0,15 \text{ mg dm}^{-3}$, porém, nas doses maiores se evidenciou que o primeiro condicionou plantas menos vistosas. Em oposição, o efeito do excesso de B foi menos influente no tratamento com baixa acidez.

Em sincronia parcial com o observado para a parte aérea como um todo, constatou-se impacto dos tratamentos aplicados também sobre as inflorescências do trigo (Figura 3). Em geral, tanto o tamanho como o número de inflorescências seguiu a seguinte ordem: Baixa acidez > Alta acidez > Gessagem. O efeito do excesso de B foi observado claramente sobre as inflorescências em todos os tratamentos de acidez.

Através da análise mais pormenorizada das inflorescências, observou-se que a dose de $3,50 \text{ mg B dm}^{-3}$ retardou o desenvolvimento do trigo, exceto no tratamento Baixa acidez (Figura 4). Além disso, na condição de ausência de suplementação bórica e gessagem, os órgãos de reprodução aparentavam maior fragilidade (devido a maior dificuldade para obter órgãos reprodutivos intactos, em relação aos demais tratamentos).

Em resposta à toxidez nutricional por excesso de B, são conhecidos dois efeitos, atraso ou antecipação no desenvolvimento vegetal. Conforme Reid (2007), o alto nível de B prejudica o processo fotossintético, consecutivamente, a capacidade de suprir fotossintatos para o desenvolvimento de frutos e sementes. Neste sentido, Goldberg et al. (2003) observou que plantas de melão intoxicadas por B tiveram floração atrasada, além de menor produção de frutos. Todavia, com plantas de estêvia, Lima Filho & Malavolta (1997) observaram floração antecipada, de maneira que hipotetizaram que esse efeito se manifestasse em resposta a maior produção de etileno em plantas sob toxidez.

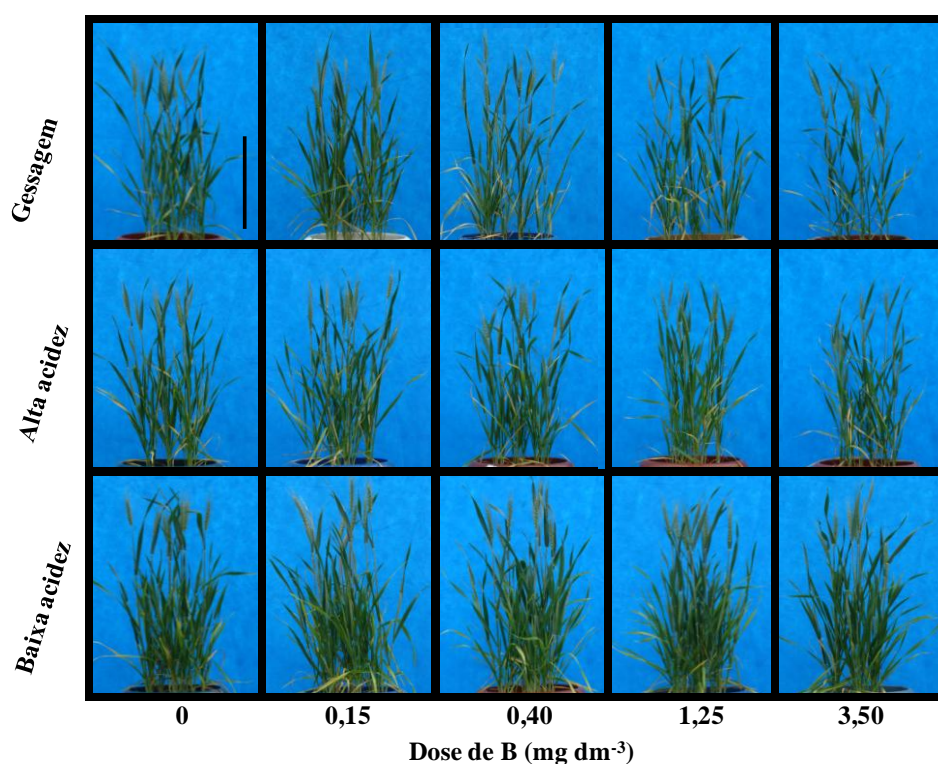


Figura 2. Aspectos visuais da parte aérea de plantas de trigo cultivadas em solo com doses de B e condições de acidez. Barra = 25 cm.

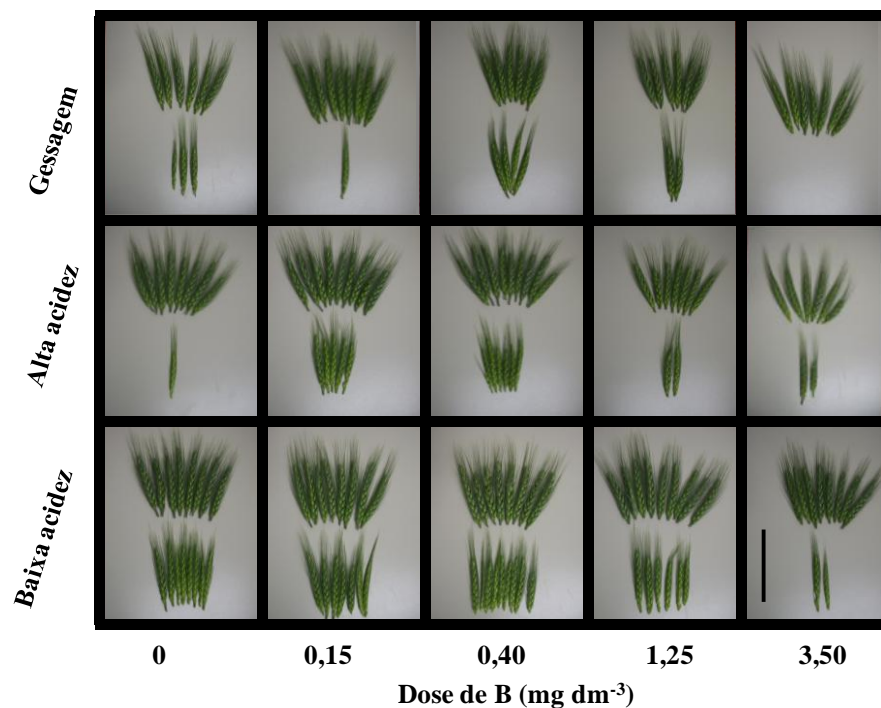


Figura 3. Aspectos visuais de inflorescências de plantas de trigo cultivadas em solo com doses de B e condições de acidez. Barra = 10 cm.

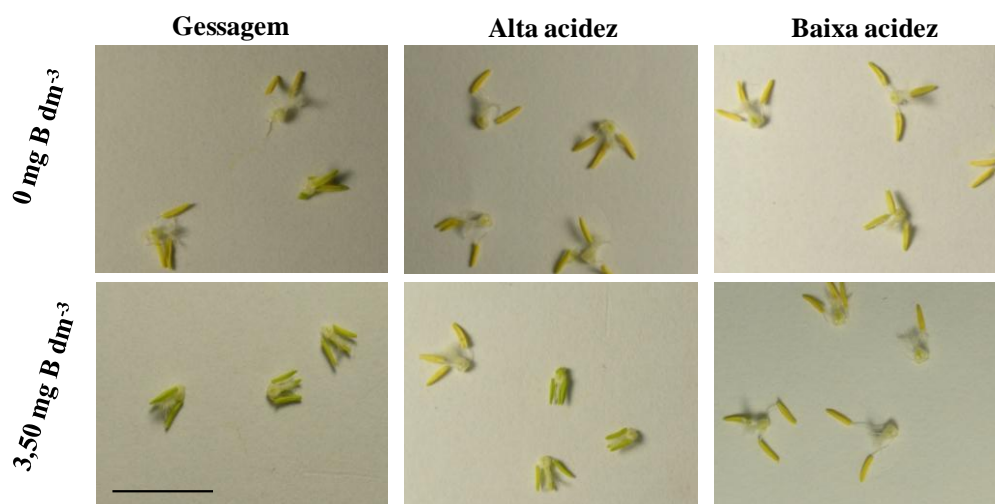


Figura 4. Aspectos visuais de órgãos reprodutivos (gineceu + androceu) de plantas de trigo cultivadas em solo com doses de B e condições de acidez. Barra = 1 cm.

3.2 PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA E TRANSPIRAÇÃO

A produção de matéria seca (MS) de trigo foi influenciada pelos tratamentos avaliados (Tabela 2). O acúmulo de MS tomando a planta como um todo, foi maior no tratamento de baixa acidez, sendo que o B afetou somente as plantas na condição Gessagem.

A MS das duas frações da parte aérea apresentaram maiores valores no tratamento com acidez trocável neutralizada, sendo que no tratamento Gessagem houve efeito para as duas frações, enquanto que para Baixa acidez somente houve variação na inflorescência, verificando efeito benéfico e tóxico do B. No primeiro, o nível de $0,15 \text{ mg B dm}^{-3}$ foi mais adequado, apesar de que só diferiu do nível tóxico. Por outro lado, no tratamento de baixa acidez, o nível que propiciou maior acúmulo foi o de $0,40 \text{ mg B dm}^{-3}$, ou seja, o nível mais adequado variou entre os tratamentos. O que foi devido a disponibilidade de B no solo (Figura 1).

Para os tratamentos de acidez, o acúmulo de matéria seca de raiz ocorreu na sequência Baixa acidez > Alta acidez > Gessagem. Já em relação aos níveis de B, somente houve efeito na última condição de acidez, onde se observou maior e menor valor com aplicação de $0,15$ e $3,50 \text{ mg dm}^{-3}$, respectivamente.

A julgar pelo conjunto, a condição do tratamento Gessagem, com Al trocável e alta relação Ca/Mg, foi aquela onde as plantas encontraram maior limitação para o acúmulo de MS (Tabela 2).

Apesar da cultura do trigo ser menos responsiva a adubação boratada, quando comparado a leguminosas, apresentou resposta depressiva ao B em condição de solo favorável a inibição de crescimento (Gessagem) para MS total. Em contraste ao que se observou neste estudo, Fageria (2000) não registrou efeito do B sobre a produção de matéria seca da parte aérea de trigo em solo do Cerrado com acidez neutralizada, provavelmente em razão de ter usado solo com maior teor inicial de B, porém, observou toxidez. O B é um micronutriente que apresenta faixa estreita entre o nível adequado e o tóxico, conforme destacado por Corrêa et al. (2006) para arroz e por Barbosa & Castamann (2008) para girassol. Contudo, no presente trabalho esse efeito somente foi constatado no tratamento Gessagem.

Tabela 2. Produção de matéria seca de plantas trigo cultivadas em solo com doses de B e condições de acidez

Tratamento	Doses de B (mg dm ⁻³)				
	0	0,15	0,40	1,25	3,50
	Matéria seca total (g planta ⁻¹)				
Baixa acidez	2,86 ^{Aa}	2,82 ^{Aa}	3,06 ^{Aa}	2,89 ^{Aa}	2,45 ^{Aa}
Alta acidez	1,99 ^{Ba}	2,05 ^{Ba}	2,03 ^{Ba}	1,78 ^{Ba}	1,65 ^{Ba}
Gessagem	1,49 ^{Cab}	1,89 ^{Ba}	1,81 ^{Ba}	1,44 ^{Bab}	1,10 ^{Cb}
CV %	15,9				
	Matéria seca folhas + caules (g planta ⁻¹)				
Baixa acidez	1,82 ^{Aa}	1,76 ^{Aa}	1,90 ^{Aa}	1,84 ^{Aa}	1,54 ^{Aa}
Alta acidez	1,29 ^{Ba}	1,24 ^{Ba}	1,25 ^{Ba}	1,10 ^{Ba}	1,03 ^{Ba}
Gessagem	0,97 ^{Bab}	1,19 ^{Ba}	1,14 ^{Ba}	0,94 ^{Bab}	0,68 ^{Cb}
CV %	14,9				
	Matéria seca inflorescências (g planta ⁻¹)				
Baixa acidez	0,56 ^{Aab}	0,55 ^{Aab}	0,61 ^{Aa}	0,55 ^{Aab}	0,41 ^{Ab}
Alta acidez	0,38 ^{Ba}	0,43 ^{Ba}	0,40 ^{Ba}	0,33 ^{Ba}	0,29 ^{Ba}
Gessagem	0,29 ^{Bab}	0,39 ^{Ba}	0,37 ^{Bab}	0,28 ^{Bab}	0,23 ^{Bb}
CV %	19,7				
	Matéria seca raiz (g planta ⁻¹)				
Baixa acidez	0,48 ^{Aa}	0,51 ^{Aa}	0,55 ^{Aa}	0,50 ^{Aa}	0,50 ^{Aa}
Alta acidez	0,32 ^{Ba}	0,38 ^{Ba}	0,38 ^{Ba}	0,35 ^{Ba}	0,33 ^{Ba}
Gessagem	0,23 ^{Bab}	0,31 ^{Ba}	0,29 ^{Bab}	0,22 ^{Cab}	0,19 ^{Cb}
CV %	16,3				

Letras minúsculas (comparam doses de B) e letras maiúsculas (comparam níveis de acidez) iguais indicam ausência de significância pelo teste de Tukey (p < 0,05).

A transpiração por planta de trigo foi impactada pelos diferentes fatores estudados, ao passo que a transpiração específica por unidade de matéria seca total e da parte aérea não seguiu esse comportamento (Figura 5). Para os tratamentos de acidez do solo, a maior transpiração esteve concatenada às plantas cultivadas no tratamento com baixa acidez. Já em relação ao B, houve divergência entre os níveis avaliados nos tratamentos Alta acidez e Gessagem. No primeiro, o nível de 0,15 mg dm⁻³ levou a maior transpiração das plantas em comparação aos dois maiores níveis (1,25 e 3,50 mg dm⁻³). No segundo, o comportamento foi diferente, no qual o nível de 0,15 mg kg⁻¹ conduziu a maior transpiração, sendo diferente da

ausência (carência) e do nível de $3,50 \text{ mg dm}^{-3}$ (toxidez).

Em geral, a transpiração seguiu a tendência do acúmulo de matéria seca da parte aérea, o que era esperado (Ben-Gal & Shani, 2002). Portanto, nos tratamentos com maior matéria seca, tem-se maior exigência, onde a exploração de camadas mais profundas do solo passa a ser mais importante. Assim, o efeito do B na condição de Gessagem, onde houve maior crescimento de raízes poderia contribuir para a absorção, sobretudo, num caso potencial de deficiência hídrica, se a camada sub-superficial apresenta-se acidez trocável alta e desbalanço catiônico. Não obstante a alteração transpiratória em estrita sintonia com a matéria seca das plantas, não ocorreu variação em termos de uso mais eficiente da água, julgando pela transpiração específica (Figura 5B e C).

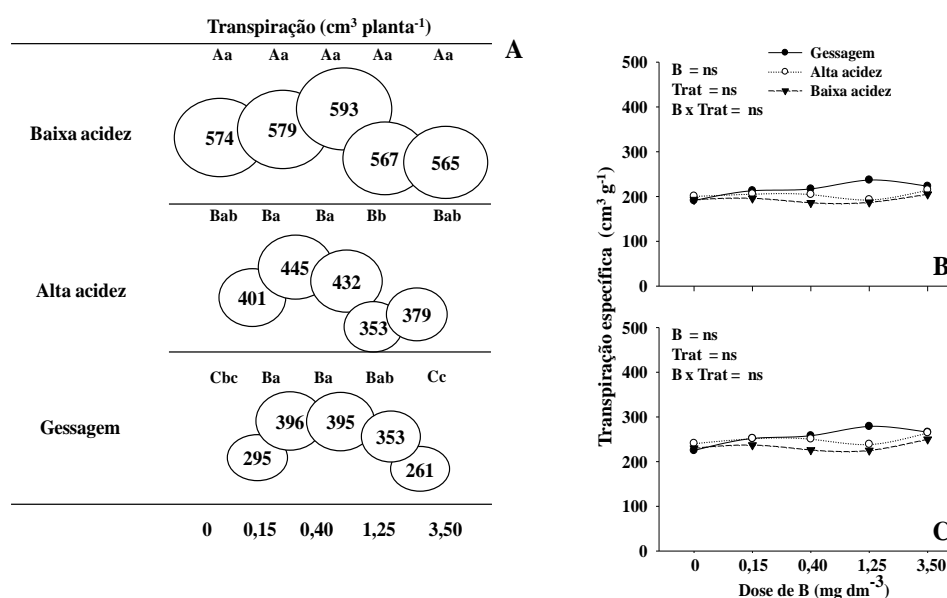


Figura 5. Transpiração (T) de plantas trigo cultivadas em solo com doses de B e condições de acidez. A = T ($\text{cm}^3 \text{ planta}^{-1}$); B = T específica ($\text{cm}^3 \text{ g}^{-1}$); C = T por MS parte aérea. Letras minúsculas (comparam doses de B) e letras maiúsculas (comparam níveis de acidez) iguais indicam ausência de significância pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

3.3 ATRIBUTOS RADICULARES

O comprimento radicular de trigo apresentou valores entre 908 (0 mg B dm^{-3}) e 1439 cm planta^{-1} ($0,15 \text{ mg B dm}^{-3}$). Quando o nível de $0,15 \text{ mg B dm}^{-3}$ foi adicionado ao solo, os tratamentos de acidez diferiram na ordem Gessagem > Alta acidez > Baixa acidez (Figura 6; Anexo 1).

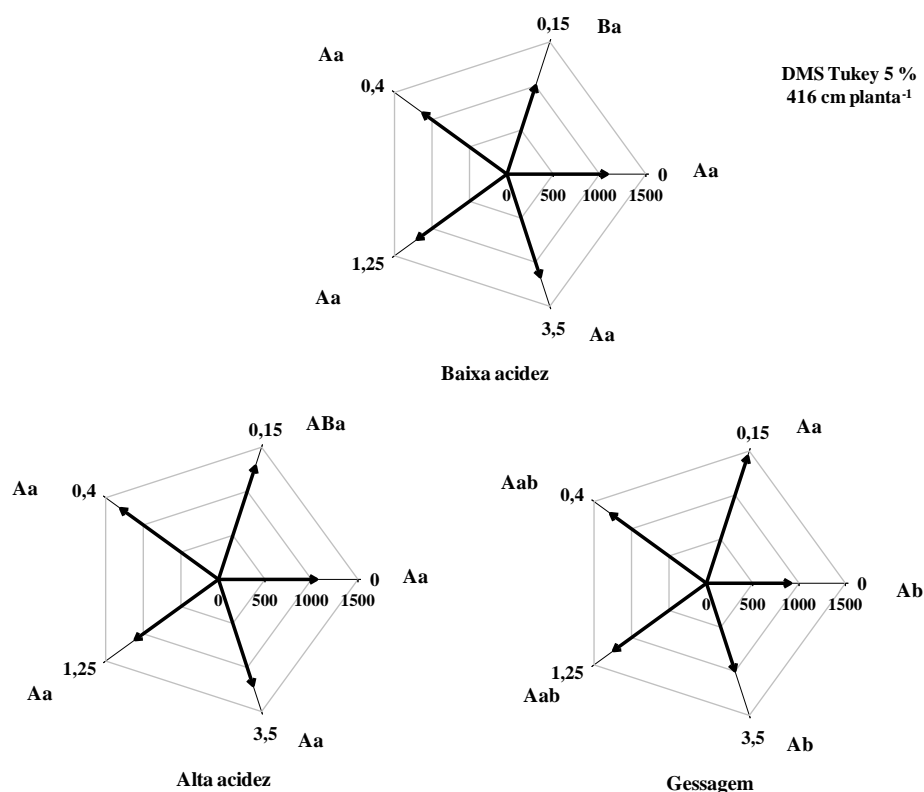


Figura 6. Comprimento radicular (cm planta⁻¹) de plantas de trigo cultivadas em solo com doses de B e condições de acidez. Letras minúsculas (comparam doses de B) e letras maiúsculas (comparam níveis de acidez) iguais indicam ausência de significância pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os tratamentos de acidez do solo apresentaram discrepâncias de área superficial radicular quando foi aplicado no solo um nível excessivo de B (3,50 mg dm⁻³). Neste cenário, a baixa acidez propiciou que as raízes de trigo tivessem área superficial cerca de 32 e 10 % superior ao tratamento Gessagem e Alta acidez, respectivamente (Figura 7; Anexo 1). Em relação ao B, houve efeito somente no tratamento com gessagem.

O volume radicular de trigo foi de 4,16 até 9,49 cm³ planta⁻¹, sendo que sem adição e aplicando 1,25 e 3,50 mg B dm⁻³ o tratamento de acidez Baixa acidez teve raízes de maior volume. Assim, com aplicação de B no nível de 0,15 e 0,40 mg dm⁻³ os tratamentos com acidez trocável não neutralizada apresentaram volume radicular similar à condição neutralizada (Figura 8; Anexo 1).

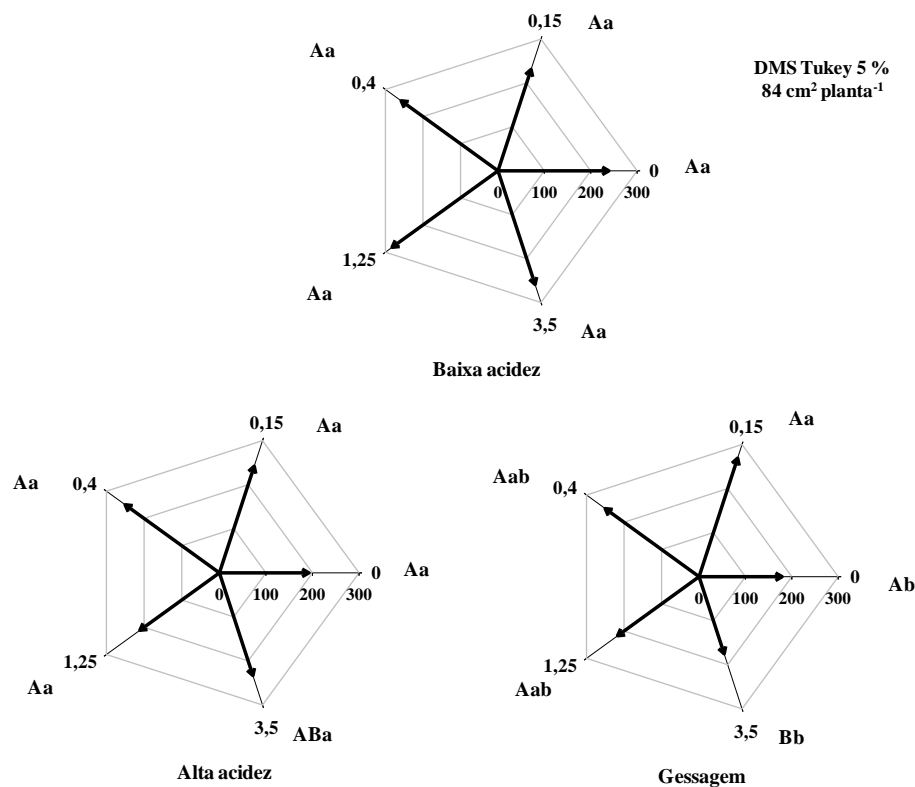


Figura 7. Área superficial radicular (cm² planta⁻¹) de plantas de trigo cultivadas em solo com doses de B e condições de acidez. Letras minúsculas (comparam doses de B) e letras maiúsculas (comparam níveis de acidez) iguais indicam ausência de significância pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

No tratamento de acidez Gessagem, pode-se dizer que a condição de cultivo foi mais extrema, provavelmente devido ao altíssimo teor de Ca no solo e baixo de Mg (desbalanço catiônico), em associação com a presença de Al trocável. Em contraste, o tratamento Alta acidez, apesar da acidez (ativa e trocável), têm cátions em teores baixos, porém, não demasiadamente desbalanceados. Assim, o efeito do B na promoção do crescimento radicular corrobora com os resultados observados por LeNoble et al. (1996), apenas na condição mais estressante para o trigo (Gessagem).

Por outro lado, em específico aos tratamentos de acidez verifica-se interessante plasticidade fenotípica nos órgãos subterrâneos (Figura 6; 7 e 8; Anexo 1). O sistema radicular em condições de acidez trocável elevada teve, em geral, ínfima diferenciação da condição de neutralização desta acidez no que tange os atributos de comprimento e área

superficial. Porém, a calagem total (Baixa acidez), ao elevar o pH, neutralizar a acidez trocável e suprir Ca e Mg incrementou o calibre do sistema radicular. Dessa forma, a diferença entre a matéria seca de raízes (Tabela 2) ocorreu em função do incremento de volume na condição de baixa acidez.

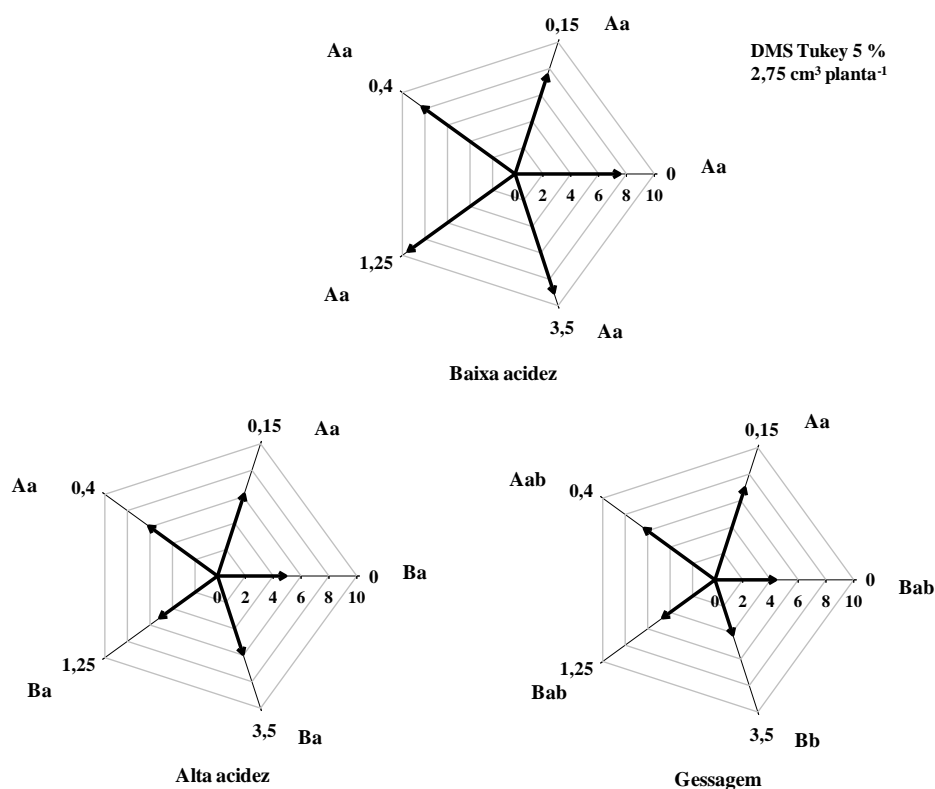


Figura 8. Volume radicular ($\text{cm}^3 \text{ planta}^{-1}$) de plantas de trigo cultivadas em solo com diferentes doses de B e condições de acidez. Letras minúsculas (comparam doses de B) e letras maiúsculas (comparam níveis de acidez) iguais indicam ausência de significância pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

A CTC radicular não variou como resposta da aplicação de doses crescentes de B, comportamento vigente em todos os níveis de acidez. Entretanto, na ausência de aplicação do micronutriente registrou-se que seus valores seguiram a ordem: Baixa acidez > Gessagem > Alta acidez (Figura 9).

Em trabalho com parede celulares de raízes de feijoeiro, Stass et al. (2007) reportaram que a aplicação de B reduz a quantidade de substâncias pécticas e aumenta o grau de desmetilação, o que reduz a CTC. Assim, apesar dos dados terem sido obtidos em condições

diferentes e as doses de B não terem diferido entre si, os resultados do trabalho supracitado esclarecem os resultados de CTC radicular de trigo cultivado no solo. De maneira que somente na condição sem adição de B é que se constatarem variações significativas de CTC em função dos níveis de acidez.

Em paralelo, os resultados referentes aos tratamentos de acidez do solo corroboram com Haynes & Ludecke (1981) para fabáceas e, com Ray & George (2011) para poáceas, os quais observaram que o aumento na CTC em raízes esteve relacionado com a elevação do pH do solo. Esse comportamento pode ser explicado pela redução da acidez trocável no tratamento com baixa acidez, decorrente da calagem elevada, tendo em vista que experimentos em solução nutritiva demonstram que o Al tem forte ligação com os componentes das paredes celulares (Keltjens, 1995; Zheng et al., 2004).

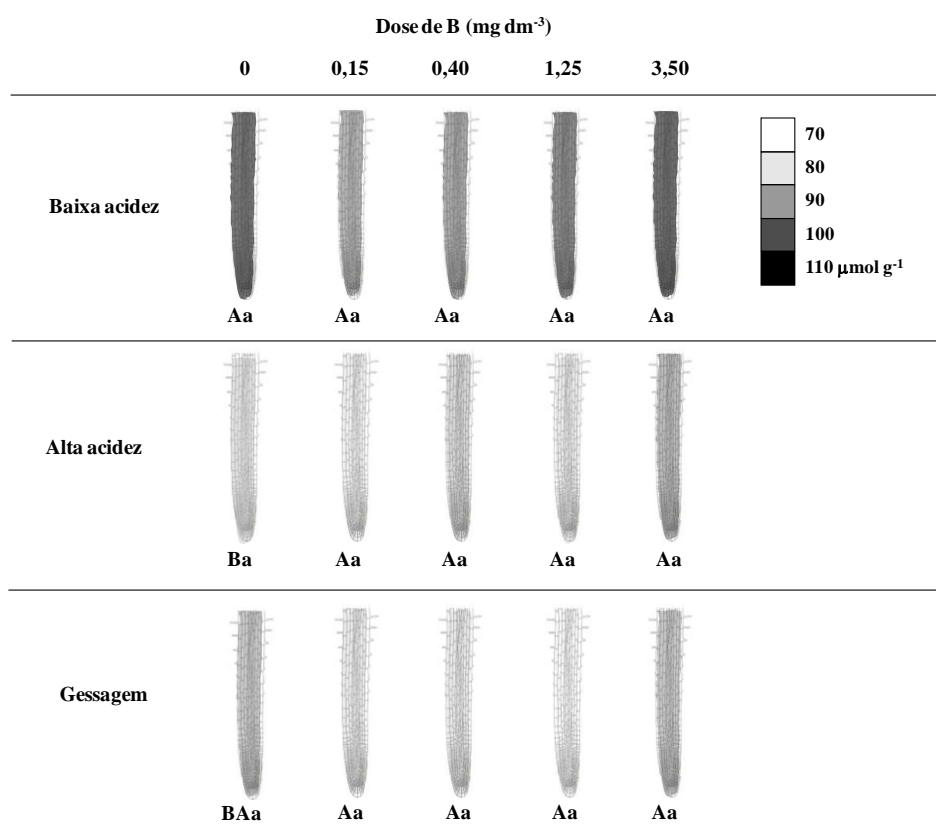


Figura 9. Capacidade de troca de cátions radicular ($\mu\text{mol g}^{-1}$) de plantas de trigo cultivadas em solo com doses de B e condições de acidez. Letras minúsculas (comparam doses de B) e letras maiúsculas (comparam níveis de acidez) iguais indicam ausência de significância pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

3.4 QUÍMICA DO SOLO RIZOSFÉRICO E NÃO RIZOSFÉRICO

Foi registrado efeito rizosférico (ER) para o atributo químico pH-CaCl₂ do solo, independente dos tratamentos aplicados, contudo o ER foi ligeiramente superior no tratamento Baixa acidez (Figura 10). A rizosfera pode apresentar tanto acidificação como alcalinização, o que depende das condições edáficas em que determinada espécie vegetal se encontra, além de variações espaço-temporais (Hinsinger et al., 2009; Brasil et al., 2011).

As alterações de pH devem estar relacionadas à absorção de N. No tratamento Baixa acidez, o pH mais elevado do solo matriz favorece a atividade de bactérias nitrificadoras, que mantém mais N na forma de nitrato (NO₃⁻) (Silva & Vale, 2000). Assim, quando mais nitrato é absorvido em detrimento do amônio (NH₄⁺), para equilibrar o potencial eletroquímico celular, maior é a extrusão de hidroxilas (OH⁻) na rizosfera, gerando assim, alcalinização (Neumann & Römheld, 2012). Além disso, as plantas cultivadas em solo sem acidez trocável acumularam mais matéria seca e transpiraram mais, provavelmente também absorvendo mais N. Contudo, o processo de nitrificação também gera acidez, dessa forma, a magnitude do efeito de alcalinização pode ser reduzido. Por outro lado, nos tratamentos de maior acidez do solo matriz, é provável que o processo de nitrificação sendo menor ou nulo, ocorra maior absorção de NH₄⁺, com efeito inverso da absorção de NO₃⁻, ou seja, acidificando mais a rizosfera (Neumann & Römheld, 2012). Portanto, os resultados devem-se possivelmente a esta gama de fatores, não obstante, com predominância de alcalinização da rizosfera.

Por fim, como a alcalinização prevaleceu em todos os tratamentos de acidez e de forma independente das doses de B, a amenização da toxidez de Al pelo B não parece ter ligação, pelo menos não na escala de rizosfera que a metodologia de coleta de solo abrangeu.

O teor de K foi afetado pelos tratamentos de acidez, em que o tratamento Baixa acidez apresentou os menores valores (Figura 10). A faixa de teor variou de 0,25-0,43 cmol_c dm⁻³ no solo rizosférico e de 0,20-0,37 cmol_c dm⁻³ no solo matriz, amplitude que foi suficiente para caracterizar o ER. O efeito cumulativo de K na rizosfera do trigo corrobora com diferentes trabalhos (Xu & Liu, 1983; Turpault et al., 2005), provavelmente pela chegada até as raízes ser maior que a demanda da planta. Esse fato se soma ao fator idade, uma vez que Vetterlein & Jahn (2004) observaram depleção de K na rizosfera de plantas com 12 dias e acúmulo em plantas com 29 dias.

A variação do Ca no solo seguiu na tendência da condição inicial de cultivo (Tabela 1; Figura 10), nessa linha, houve efeito dos níveis de acidez para solo matriz. Em adição, exceto

no tratamento Alta acidez, ocorreu maior acúmulo de Ca no solo rizosférico com ausência de adição de B. O Ca entra em contato com o sistema radicular preferencialmente por fluxo de massa, sendo que em geral ocorre acúmulo na rizosfera (Hinsinger et al., 2009), porém, não se registrou tal comportamento.

O teor de Mg no solo também seguiu a tendência da condição inicial de cultivo, em relação aos tratamentos de acidez, uma vez que a quantidade adicionada foi variável entre estes (Tabela 1; Figura 10). Contudo, observou-se ER para as doses de 0,15 e 0,40 mg B dm⁻³ no tratamento Gessagem, com os menores teores de Mg no solo rizosférico. Por outro lado, apesar de não ter ocorrido ER no tratamento Baixa acidez, constatou-se redução do nutriente na rizosfera das plantas cultivadas com aplicação de 0,40 mg B dm⁻³. Em ambos os tratamentos de acidez, a depleção ocorreu onde as plantas acumularam mais matéria seca (Tabela 2) e, no caso do tratamento Gessagem, onde também ocorreu estímulo ao crescimento de raízes.

A relação Ca/Mg no solo rizosférico e no solo matriz diferiu entre os tratamentos de acidez do solo, seguindo a ordem: Gessagem > Baixa acidez > Alta acidez, seguindo a tendência da condição inicial de química do solo (Figura 11; Tabela 1). Contudo, observou-se interação entre os fatores avaliados – níveis de acidez *versus* doses de B –, onde somente no primeiro nível supradescrito houve variação em função do B, refletindo, por fim, em ER. A maior relação na rizosfera das plantas do tratamento Gessagem é consistente com a depleção de Mg na rizosfera (Figura 11), o que indica demanda maior que o fornecimento via fluxo de massa.

Quanto à soma de bases (SB), efeito significativo de ambos os fatores avaliados ocorreu no solo matriz, e a interação de fatores no solo rizosférico. Em relação aos níveis de acidez os dados são sincrônicos com a condição inicial da fertilidade química do solo (Figura 11; Tabela 1), já o impacto do fator B, tem-se, em geral, que as doses extremas – 0 e 3,50 mg dm⁻³ – diferiram entre si. O que demonstra que a maior dose proporcionou efeito tóxico as plantas, com menor retirada de bases do solo. O efeito do B para o solo rizosférico ocorreu no tratamento Gessagem e Baixa acidez, onde na ausência de aplicação do micronutriente houve maior acúmulo de bases.

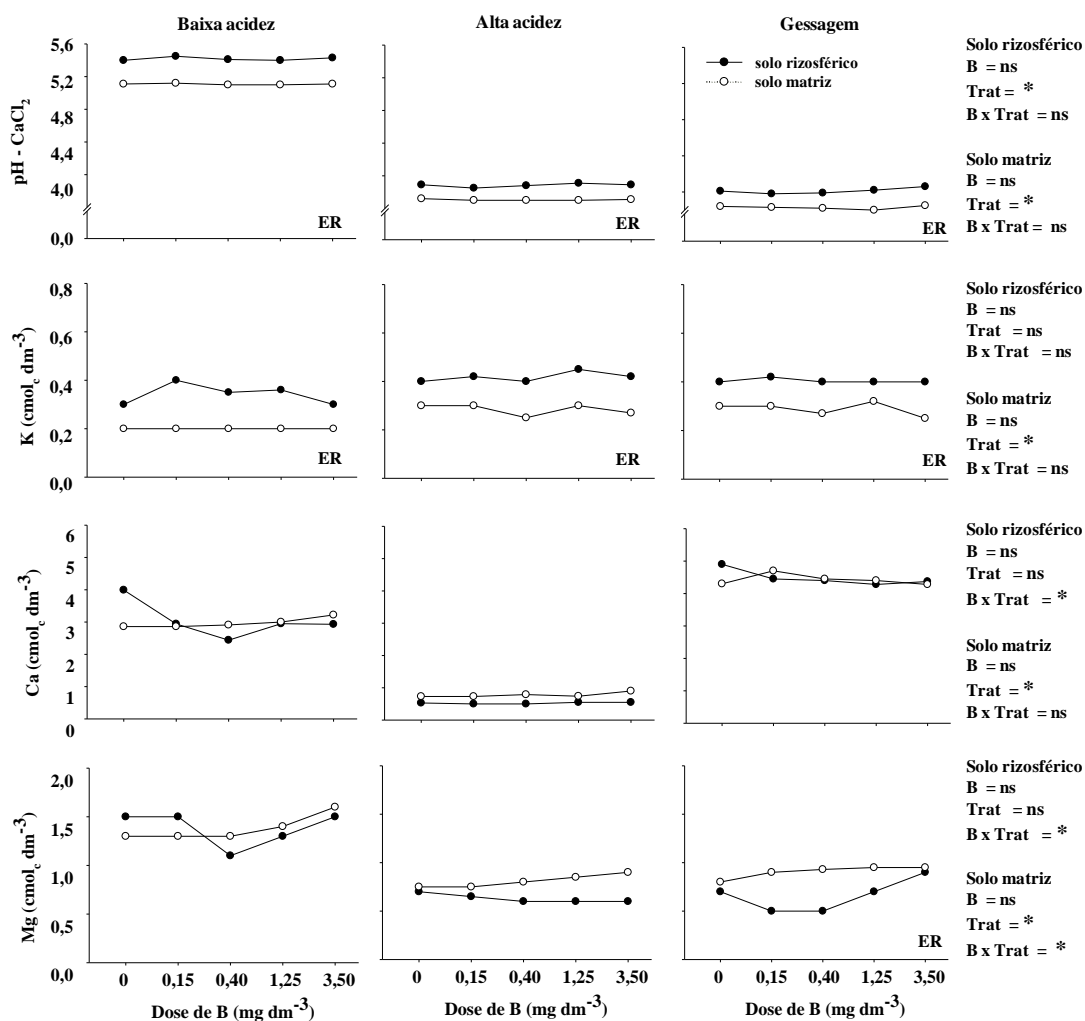


Figura 10. pH-CaCl₂, K, Ca e Mg em solo matriz e rizosférico de plantas de trigo cultivadas com doses de B e condições de acidez. * = efeito pelo teste F. ER = efeito rizosférico.

Com amplitude no teor de P de 15 a 19 mg dm⁻³ no solo rizosférico e 23 a 35 mg dm⁻³ no solo matriz, evidente foi a depleção deste nutriente na rizosfera. A depleção rizosférica típica deste macronutriente corrobora com diferentes autores (Lewis & Quirk, 1967; Gahoonia et al., 2001; Wang et al., 2005). O contato do P com a raiz ocorre através do mecanismo de difusão, sendo que o coeficiente de difusão do P-HPO₄⁻ é em torno de 10⁻¹² – 10⁻¹⁵ m² s⁻¹, o que é extremamente lento se comparado ao K⁺ (10⁻¹¹ – 10⁻¹² m² s⁻¹) (Neumann & Römhald, 2012). Em adição, o P é em geral fortemente adsorvido nas partículas coloidais do solo (Novais & Smyth, 1999). Assim, a absorção leva ao rápido esgotamento de P na rizosfera, de maneira que este não é reposto na taxa em que a planta o absorve. Apesar disso, os fatores em estudo (acidez e B) não tiveram impacto com significância.

Não houve ER para o nutriente B, sendo que este teve variação no solo matriz e rizosférico de acordo com as doses aplicadas (Figura 11). Contudo, na condição matriz o B diferiu entre os níveis de acidez, sendo que no tratamento Baixa acidez os teores foram ligeiramente menores – exceto na maior dose – que nos demais tratamentos. Em geral, o B é contactado pelas raízes através do fluxo de massa, contudo, quando em condições de deficiência hídrica o mecanismo de difusão passa a ser importante (Mattiello et al., 2009). No caso do trigo, o fluxo de massa deve ter assumido maior importância, uma vez que a umidade do solo foi mantida fora da faixa de deficiência. A ausência de ER deve estar relacionada ao fluxo de massa não exceder a absorção (sem acúmulo) e pela baixa retenção às partículas de solo (sem depleção) (Goldberg, 1997).

O teor de Fe no solo matriz apresentou os menores valores na condição de baixa acidez, sem efeito das doses de B (Figura 12). Para o solo rizosférico o nutriente Fe foi extraído em maior quantidade nos tratamentos Gessagem e Alta acidez. Contudo, houve efeito rizosférico no pH sem afetar os teores de Fe. Em adição, no primeiro tratamento a dose de $3,50 \text{ mg B dm}^{-3}$, em comparação a ausência de adição, levou a um menor acúmulo rizosférico do nutriente em questão. O efeito da elevada dose B concatena-se com a menor produção de matéria seca no tratamento em questão (Figura 2). Por fim, o efeito sobre o Fe extraído foi muito tênue.

Em solos aerados o Fe encontra-se preferencialmente na forma oxidada (Fe^{3+}), que apresenta baixa solubilidade. Contudo, as plantas desenvolveram estratégias para adquirir Fe nestas condições de baixa disponibilidade, sob alterações rizosféricas como: exsudação de substâncias complexantes (passíveis de absorção), acidificação da rizosfera, interações com micorrizas ou alterações morfo-anatômicas no sistema radicular (Marschner et al., 2011; Marschner, 2012).

Tendo valores entre $25\text{-}31 \text{ mg dm}^{-3}$ (matriz) e $22\text{-}28 \text{ mg dm}^{-3}$ (rizosfera), não se registrou ER, tão pouco variação entre fatores avaliados para o micronutriente Mn no solo (Figura 12). O comportamento do Mn em solos aerados, a exemplo do Fe, é peculiar, sendo que sua principal forma química é Mn^{4+} (oxidada), porém, a absorção radicular ocorre com a forma Mn^{2+} (reduzida) (White, 2012). Portanto, alterações rizosféricas que visem a redução do Mn são importantes para a sua aquisição em solos de pH mais elevado ($> 5,5$), sendo que estas alterações podem ser pelas vias enzimática, química ou biológica (Godo & Reisenauer, 1980). Em solos com acidez elevada ($< 5,5$) pode ocorrer maior solubilidade do Mn, de

maneira que a carência cede espaço a potencial toxidez (Nogueira, 2001), porém, os teores no solo matriz não foram variantes significativamente entre os tratamentos de acidez.

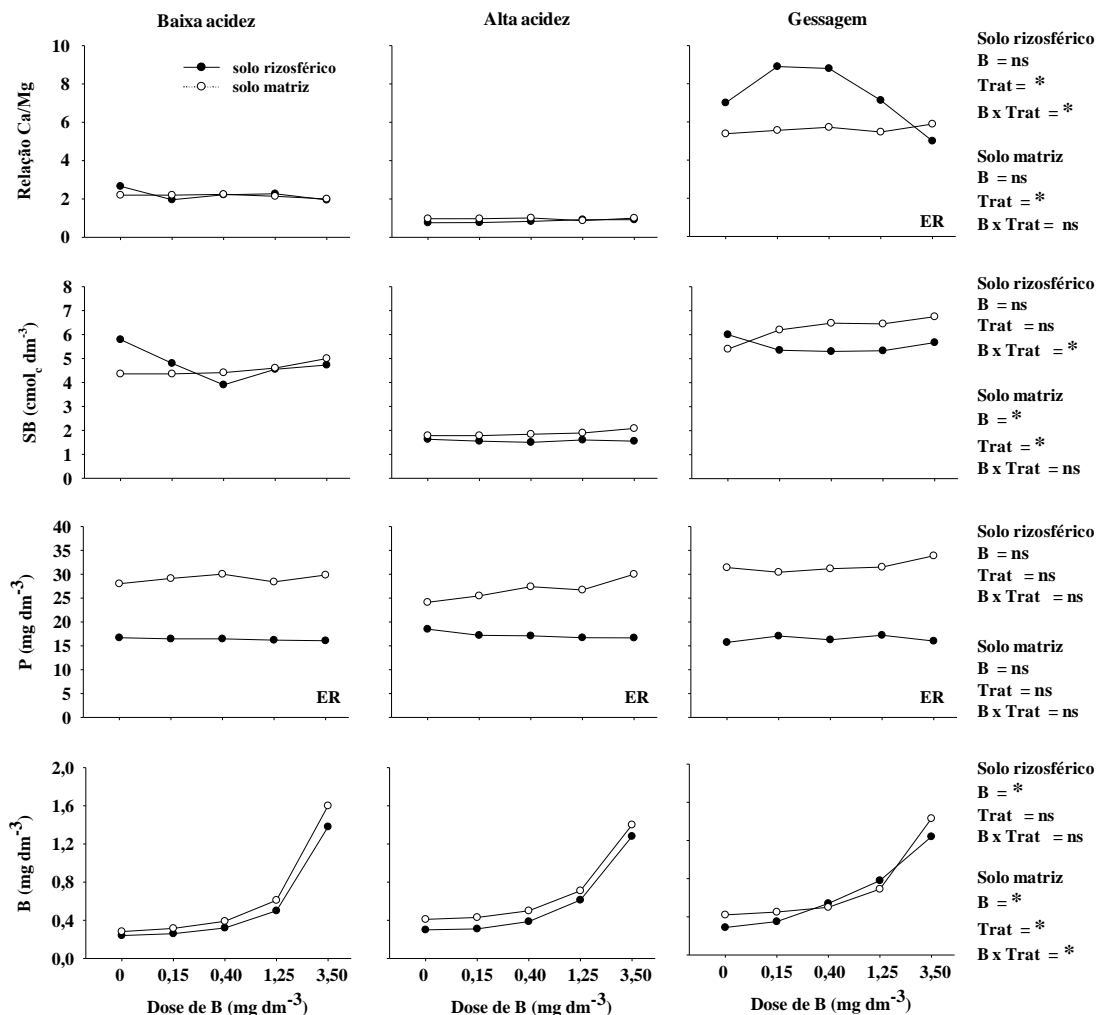


Figura 11. Relação Ca/Mg, soma de bases (SB), P e B em solo matriz e rizosférico de plantas de trigo cultivadas com doses de B e condições de acidez. * = efeito pelo teste F. ER = efeito rizosférico.

O nutriente Zn foi marcado pelo ER, no qual ocorreu depleção deste na rizosfera (Figura 12). Em relação aos níveis de acidez, o tratamento Gessagem teve, em comparação aos demais, teores maiores no solo matriz. Além disso, foi o único tratamento de acidez onde se pronunciou o efeito do B na rizosfera, com teor mais elevado na dose de 0,15 mg dm⁻³, coincidindo com o maior acúmulo de matéria seca (Tabela 2).

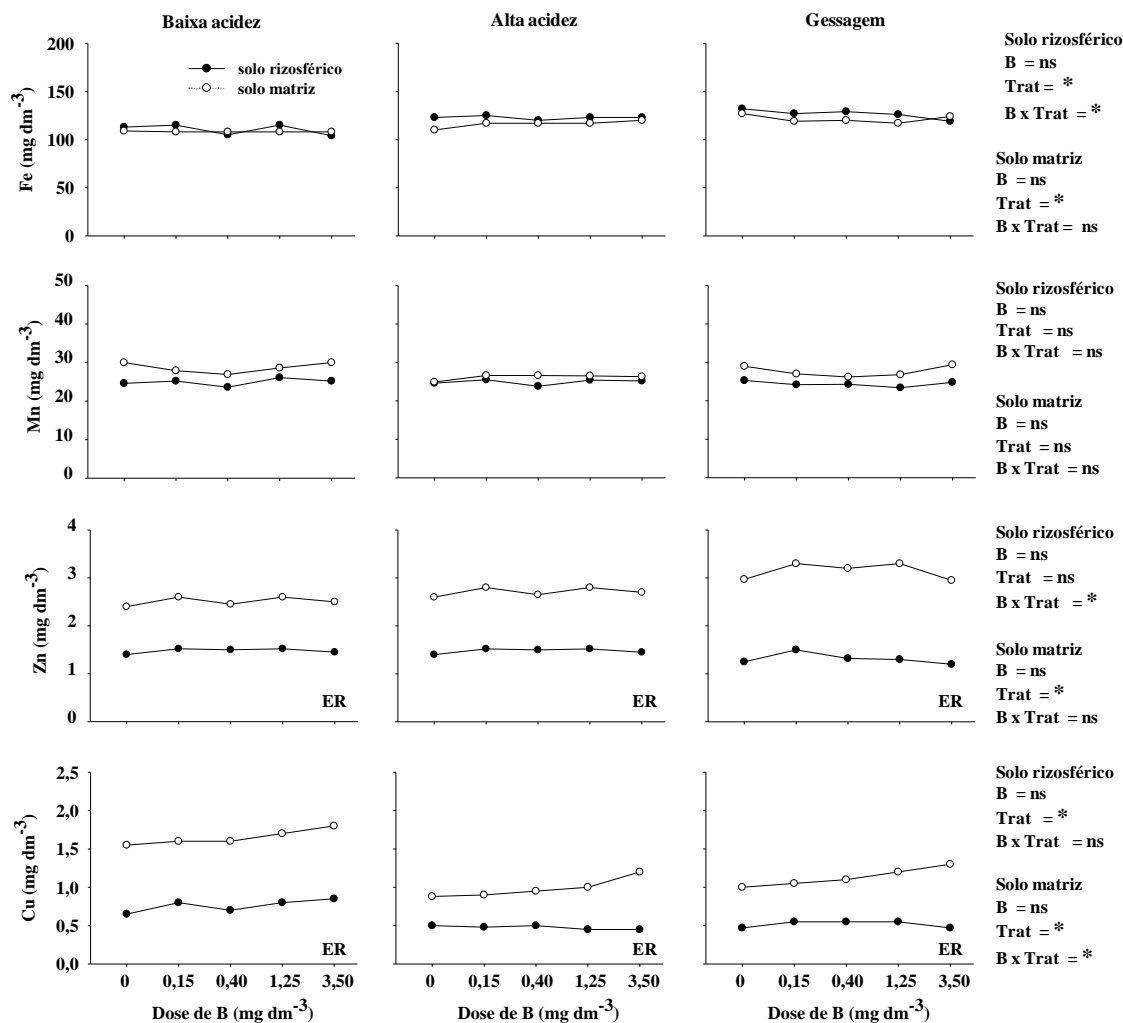


Figura 12. Fe, Mn, Zn e Cu em solo matriz e rizosférico de plantas de trigo cultivadas com doses de B e condições de acidez. * = efeito pelo teste F. ER = efeito rizosférico.

Semelhante ao Zn, o micronutriente catiônico Cu também teve ER marcado pela depleção rizosférica (Figura 12). O tratamento com baixa acidez teve teores ligeiramente superiores nas diferentes condições de solo. Já em relação ao fator B, para o solo matriz, tem-se que com o aumento na dose ocorre maior acúmulo de Cu. Com milho, Tao et al. (2003) observaram que, inicialmente (15 dias) ocorre acúmulo de Cu trocável no solo rizosférico, todavia, posteriormente (50 dias) a depleção predomina, portanto, corroborando com os resultados da rizosfera de trigo (colheita aos 50 DAE).

3.5 ESTADO NUTRICIONAL E TEOR DE ALUMÍNIO

Os teores de B nos diferentes tecidos avaliados foram variantes tanto em função das doses aplicadas como para as condições de acidez do solo (Tabela 3). Em geral, os teores acompanharam o aumento imposto pela adição de doses crescentes de B, tendo para raiz, caule + folha e inflorescência amplitude de 14-29, 11-74 e 19-50 mg kg⁻¹, respectivamente. A aplicação de calagem a 100 % da recomendação resultou em menores teores de B em todos os tecidos vegetais analisados (tratamento com baixa acidez). Esses aspectos, tanto de doses como de correção da acidez, foram observados por Pegoraro et al. (2008) em plantas de soja. O que está relacionado com a disponibilidade do micronutriente. A distribuição de B entre os diferentes tecidos analisados indica que este não foi retido nas raízes, e sim, preferencialmente nos órgãos aéreos.

Tabela 3. Teores de B (mg kg⁻¹) nos tecidos de raiz, caule + folha e inflorescência de trigo cultivado solo com doses de B e níveis de acidez

Tratamento de acidez	Doses de B (mg dm ⁻³)				
	0	0,15	0,40	1,25	3,50
	Raiz				
Baixa acidez	15 ^{Bc}	16 ^{Bbc}	14 ^{Cc}	18 ^{Bb}	24 ^{Ba}
Alta acidez	19 ^{Ac}	20 ^{Abc}	17 ^{Bd}	22 ^{Ab}	28 ^{Aa}
Gessagem	18 ^{Ab}	20 ^{Aab}	21 ^{Aab}	21 ^{Aab}	29 ^{Aa}
CV %	9,0				
	Caule + Folha				
Baixa acidez	11 ^{Bc}	11 ^{Bc}	15 ^{Bbc}	19 ^{Bb}	40 ^{Ca}
Alta acidez	15 ^{Ad}	16 ^{Ac}	19 ^{Ac}	26 ^{Ab}	74 ^{Aa}
Gessagem	13 ^{ABd}	14 ^{Ad}	18 ^{ABc}	23 ^{ABb}	69 ^{Ba}
CV %	13,0				
	Inflorescência				
Baixa acidez	15 ^{Bc}	16 ^{Bc}	22 ^{Bb}	23 ^{Bb}	28 ^{Ca}
Alta acidez	20 ^{Ac}	20 ^{Ac}	30 ^{Ab}	30 ^{Ab}	39 ^{Ba}
Gessagem	21 ^{Ac}	22 ^{Ac}	32 ^{Ab}	31 ^{Ab}	50 ^{Aa}
CV %	10,0				

Letras minúsculas (comparam doses de B) e letras maiúsculas (comparam níveis de acidez) iguais indicam ausência de significância pelo teste de Tukey (p < 0,05).

Os fatores de acidez do solo e doses de B proporcionaram variação nos teores de Al apenas na parte aérea das plantas de trigo (Tabela 4). A aplicação de calagem total reduziu a concentração de Al na fração caule + folha, porém, o foi com significância apenas quando não se aplicou B e quando da adição de $1,25 \text{ mg B dm}^{-3}$. Em paralelo, no tecido das inflorescências aquele tratamento de acidez reduziu os teores de Al de maneira independente do fator B.

Em relação as doses de B, verifica-se que houve efeito nos tratamentos com acidez trocável não neutralizada. Em ambos, com incremento de B aplicado no solo houve decréscimo no teor de Al no tecido da fração caule + folha, sendo este efeito mais transparente para o tratamento com alta acidez. Essa redução em resposta ao B corrobora com estudos realizados em condições hidropônicas com plantas de ervilha (Yu et al., 2009) e pomelo (Jiang et al., 2009). Destarte, esse poderia ser um mecanismo amenizante da toxidez alumínica (Chen et al., 2010). Contudo, para as inflorescências os maiores teores de Al foram observados quando adicionados $3,50 \text{ mg B dm}^{-3}$, apesar de que para as demais doses esse elemento variou pouco.

Um dos fatores que agrava o efeito do Al em solos ácidos é a carência de Ca (George et al., 2012). Assim com a adição deste macronutriente, tem se adequação à exigência nutricional da planta e a redução da atividade do Al, sendo que com menor atividade, pode ocorrer redução potencial da toxidez (Hossain et al., 2005). Entretanto, no presente trabalho se verificou redução do teor de Al no tratamento gessagem (alto Ca) apenas na ausência de B e na fração caule + folha. Em função desta, é que a redução de Al na fração caule + folha em resposta a adição de B foi mais clara no tratamento com alta acidez. Por outro lado, o tratamento com baixa acidez, foi mais impactante, porém, além de suprir Ca e reduzir a atividade de Al, eleva o pH, que por sua vez, reduz o Al trocável.

Os teores de Al nos diferentes tecidos analisados demonstram que este elemento é peremptoriamente retido nas raízes, com translocação drasticamente limitada para a parte aérea, de maneira que no tecido das inflorescências registraram-se os menores teores. Nessa ótica, Clark (1977), Shen & Ma (2001) e, Silva et al. (2009) também reportam o acúmulo no sistema radicular em detrimento de tecidos da parte aérea. Essa reduzida translocação foi observada por Lavado et al. (2001) para outros metais pesados (Pb, Ni e Cr) em trigo. Não obstante, em plantas que não são naturalmente acumuladoras de Al, essa reduzida translocação é um mecanismo que protege os tecidos da parte aérea, tendo em vista que o

aparato fotossintético das plantas é sensível a presença deste elemento (Jiang et al., 2009; Chen et al., 2010). Entretanto, diversas espécies nativas de solos ácidos apresentam alta translocação no *continuum* raiz-parte aérea (Serrano et al., 2011), sem danos aos cloroplastos (Andrade et al., 2011).

Tabela 4. Teores de Al (mg kg⁻¹) nos tecidos de raiz, caule + folha e inflorescência de trigo cultivado solo com doses de B e níveis de acidez

Tratamento de acidez	Doses de B (mg dm ⁻³)				
	0	0,15	0,40	1,25	3,50
Raiz					
Baixa acidez	3970	3140	3720	3400	3130
Alta acidez	3170	2680	2410	3100	3060
Gessagem	3520 ^{ns}	3800	3580	3900	4090
CV %	22,8				
Caule + Folha					
Baixa acidez	28 ^{Ba}	30 ^{Aa}	29 ^{Aa}	27 ^{Ba}	25 ^{Aa}
Alta acidez	50 ^{Aa}	39 ^{Ab}	30 ^{Ac}	30 ^{ABc}	29 ^{Ad}
Gessagem	38 ^{ABa}	35 ^{Aab}	36 ^{Aab}	37 ^{Aab}	26 ^{Ab}
CV %	24,8				
Inflorescência					
Baixa acidez	7 ^{Ba}	7 ^{Ba}	7 ^{Ba}	8 ^{Ba}	6 ^{Ba}
Alta acidez	11 ^{Ab}	12 ^{Aab}	11 ^{ABb}	11 ^{ABb}	14 ^{Aa}
Gessagem	11 ^{Ab}	12 ^{Aab}	13 ^{Aab}	13 ^{Aab}	15 ^{Aa}
CV %	22,8				

Letras minúsculas (comparam doses de B) e letras maiúsculas (comparam níveis de acidez) iguais indicam ausência de significância pelo teste de Tukey (p < 0,05).

A forte interação com os órgãos subterrâneos decorre da afinidade do Al com os componentes da parede celular, que o retém fortemente (Horst et al., 2010). Contudo, com a neutralização da acidez trocável poderiam ser esperados teores menores na raiz, o que de fato não ocorreu no tratamento Calagem 100 %. Todavia, a elevação de pH do solo neutraliza o Al³⁺, mas não elimina outras formas de Al [Al(OH)₂⁺] (Sousa et al., 2007), dessa forma, apesar de menos tóxicas para as raízes, é verossímil que também sejam acumuladas no tecido subterrâneo. Por fim, em ambientes ácidos, espécies arbóreas nativas podem apresentar teor

de até 6000 mg Al kg⁻¹ nas raízes (Serrano et al., 2011), ao passo que espécies pteridófitas atingem em torno de 12000 mg kg⁻¹ (Olivares et al., 2009).

Entre os diferentes tecidos vegetais analisados, os teores de P variaram somente na inflorescência, com efeito significativo das doses de B e dos tratamentos de acidez do solo (Tabela 5). As doses de B foram influentes apenas nos tratamentos com acidez trocável não corrigida, sendo naquele com gessagem o incremento de dose repercutiu em redução de P, enquanto que no tratamento de alta acidez os extremos foram vigentes com 0,15 e 3,50 mg B dm⁻³. Portanto, menor concentração na dose que causou toxidez as plantas de trigo (Tabela 2). Por outro lado, o primeiro tratamento citado foi, em comparação aos demais níveis de acidez, aquele com menor teor de P.

Tabela 5. Teores de P (g kg⁻¹) nos tecidos de raiz, caule + folha e inflorescência de trigo cultivado solo com doses de B e níveis de acidez

Tratamento de acidez	Doses de B (mg dm ⁻³)				
	0	0,15	0,40	1,25	3,50
	Raiz				
Baixa acidez	1,21	1,17	1,21	1,17	1,17
Alta acidez	1,22	1,40	1,41	1,36	1,31
Gessagem	1,37 ^{ns}	1,27	1,39	1,27	1,24
CV %	8,8				
	Caule + Folha				
Baixa acidez	1,96	1,91	1,90	1,97	1,95
Alta acidez	1,83	1,92	1,89	1,80	1,92
Gessagem	1,74 ^{ns}	1,86	1,78	1,78	1,69
CV %	10,8				
	Inflorescência				
Baixa acidez	2,23 ^{Aa}	2,25 ^{Aa}	2,33 ^{Aa}	2,20 ^{Aa}	2,10 ^{Aa}
Alta acidez	2,32 ^{Aab}	2,39 ^{Aa}	2,26 ^{Ab}	2,30 ^{Aab}	2,18 ^{Ab}
Gessagem	1,98 ^{Ba}	1,94 ^{Bab}	1,88 ^{Bab}	1,62 ^{Bb}	1,56 ^{Bb}
CV %	7,8				

Letras minúsculas (comparam doses de B) e letras maiúsculas (comparam níveis de acidez) iguais indicam ausência de significância pelo teste de Tukey (p < 0,05).

A aplicação de gesso eleva os teores de sulfato (SO_4^-) disponível no solo (Caires et al., 2003), o que deve ter induzido menor absorção de P, uma vez que a planta o absorve na forma de íons de fosfato (H_2PO_4^- ; HPO_4^{2-}) (Hinsinger, 2001). Dessa forma, como observado por Leite (1984) e Cravo et al. (1985) com plantas de soja, para que não ocorra desbalanço nutricional decorrente da alta aplicação de materiais contendo S, se faz necessário incrementar a adição de P no solo. Assim, os menores teores de P na inflorescência devem ser em resposta a aplicação elevada de gesso.

Em conjunto, os teores de P no tecido vegetal do trigo tiveram pequena amplitude (1,17-2,39 g kg⁻¹), com sequência por tecido de: inflorescência > caule + folha > raiz. Entretanto, esse comportamento é variável (Tyler & Olsson, 2001; Lavado et al., 2001).

Entre os três tipos de tecidos analisados no trigo, raiz e caule + folha tiveram teores de K influenciados exclusivamente pelos tratamentos de acidez do solo (Tabela 6). Em geral, ambos os tecidos apresentam o mesmo comportamento, no qual os maiores teores foram alcançados pelo tratamento com gessagem e os menores no tratamento com baixa acidez.

Esses resultados apontam para a competição de aquisição de macronutrientes catiônicos pelas plantas. Desse modo, a interação K *versus* Mg foi mais marcante, uma vez que os tratamentos supracitados têm altos teores de Ca no solo, sendo a diferença no teor de Mg mais marcante (Tabela 1).

Em relação a distribuição de K nos diferentes tecidos, observa-se a seguinte magnitude de teores: caule + folha > inflorescência > raiz. Avaliando os teores de macronutrientes em raízes e folhas + caules de milho, soja e trigo, Lavado et al. (2001) reportam maiores teores de K nos órgãos aéreos (~ 13,2 g kg⁻¹) do que nos subterrâneos (~ 1,35 g kg⁻¹). Esse comportamento de translocação também é coerente com Tyler & Olsson (2001).

Os fatores analisados impactaram sobre os teores de Ca apenas nos órgãos aéreos das plantas de trigo (Tabela 7). Em geral, plantas cultivadas no solo do tratamento de alta acidez apresentaram menores teores, porém, o foi significativamente apenas na fração caule + folha. Em adição, no tratamento gessagem, na ausência de adição de B houve maiores teores de Ca na inflorescência, seguido pela dose de 0,15 mg dm⁻³, que diferiram entre si.

Tabela 6. Teores de K (g kg^{-1}) nos tecidos de raiz, caule + folha e inflorescência de trigo cultivado solo com doses de B e níveis de acidez

Tratamento de acidez	Doses de B (mg dm^{-3})				
	0	0,15	0,40	1,25	3,50
Raiz					
Baixa acidez	1,20 ^{Ba}	1,35 ^{Ba}	1,28 ^{Ba}	1,45 ^{Ba}	1,20 ^{Ba}
Alta acidez	1,60 ^{ABa}	1,79 ^{ABa}	1,76 ^{ABa}	2,11 ^{ABa}	2,45 ^{ABa}
Gessagem	2,26 ^{Aa}	2,10 ^{Aa}	2,12 ^{Aa}	2,29 ^{Aa}	2,90 ^{Aa}
CV %	31,3				
Caule + Folha					
Baixa acidez	15 ^{Ba}	16 ^{Ba}	16 ^{Ba}	16 ^{Ba}	15 ^{Ba}
Alta acidez	19 ^{Aa}	19 ^{Aa}	18 ^{ABa}	20 ^{Aa}	21 ^{Aa}
Gessagem	21 ^{Aa}	19 ^{Aa}	20 ^{Aa}	22 ^{Aa}	21 ^{Aa}
CV %	11,4				
Inflorescência					
Baixa acidez	12	12	10	10	9
Alta acidez	11	10	13	11	11
Gessagem	11 ^{ns}	11	10	11	10
CV %	8,4				

Letras minúsculas (comparam doses de B) e letras maiúsculas (comparam níveis de acidez) iguais indicam ausência de significância pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O teor de Ca na condição de alta acidez é interpretado como baixo (CQFS-RS/SC, 2004). Desse modo, o estado nutricional em termos cálcicos está de acordo com o nível no solo. Todavia, em geral, foi superior aquele com gessagem em termos de acúmulo de matéria seca (Tabela 2). Assim, o que é destacadamente diferente entre os tratamentos, é o superior teor de Ca, com elevada relação Ca/Mg, e a adição de SO_4^- via gessagem.

Os tecidos da parte aérea tiveram teores de Ca próximos, sendo que maior amplitude entre estes foi observado no tratamento de baixa acidez, o qual apresenta teores ligeiramente menores na inflorescência. Por outro lado, a raiz teve teores menores que os órgãos aéreos, o que é semelhante ao reportado por Tyler & Olsson (2001).

Tabela 7. Teores de Ca (g kg^{-1}) nos tecidos de raiz, caule + folha e inflorescência de trigo cultivado solo com doses de B e níveis de acidez

Tratamento de acidez	Doses de B (mg dm^{-3})				
	0	0,15	0,40	1,25	3,50
	Raiz				
Baixa acidez	1,65	1,61	1,61	1,73	1,47
Alta acidez	1,30	1,38	1,05	1,40	1,05
Gessagem	1,60 ^{ns}	1,69	1,56	1,75	1,94
CV %	29,1				
	Caule + Folha				
Baixa acidez	5,79 ^{Aa}	4,83 ^{Aa}	5,33 ^{Aa}	5,72 ^{Aa}	5,12 ^{Aa}
Alta acidez	2,04 ^{Ca}	2,03 ^{Ca}	2,10 ^{Ca}	2,26 ^{Ca}	2,49 ^{Ca}
Gessagem	3,80 ^{Ba}	3,79 ^{Ba}	3,86 ^{Ba}	3,69 ^{Ba}	3,61 ^{Ba}
CV %	12,1				
	Inflorescência				
Baixa acidez	3,50 ^{Ba}	4,03 ^{Aa}	3,19 ^{Aa}	3,65 ^{Aa}	3,69 ^{Aa}
Alta acidez	2,20 ^{Ba}	3,41 ^{Aa}	2,87 ^{Aa}	2,50 ^{Aa}	2,70 ^{Aa}
Gessagem	5,00 ^{Aa}	4,06 ^{Ab}	3,13 ^{Abc}	3,60 ^{Aabc}	3,08 ^{Ac}
CV %	42,1				

Letras minúsculas (comparam doses de B) e letras maiúsculas (comparam níveis de acidez) iguais indicam ausência de significância pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os teores de Mg foram variantes em resposta aos tratamentos de acidez nos diferentes tecidos vegetais analisados, sem efeito das doses de B (Tabela 8). No global a magnitude de resposta foi semelhante para raiz, caule + folha e inflorescência, de modo que os teores extremos de máximo e mínimo foram observados nos tratamentos Baixa acidez e Gessagem, respectivamente.

Tabela 8. Teores de Mg (g kg^{-1}) nos tecidos de raiz, caule + folha e inflorescência de trigo cultivado solo com doses de B e níveis de acidez

Tratamento de acidez	Doses de B (mg dm ⁻³)				
	0	0,15	0,40	1,25	3,50
	Raiz				
Baixa acidez	0,82 ^{Aa}	0,83 ^{Aa}	0,80 ^{Aa}	0,87 ^{Aa}	0,75 ^{Aa}
Alta acidez	0,51 ^{Ba}	0,59 ^{Ba}	0,51 ^{Ba}	0,66 ^{Ba}	0,59 ^{Ba}
Gessagem	0,50 ^{Ba}	0,54 ^{Ba}	0,54 ^{Ba}	0,53 ^{Ba}	0,57 ^{Ba}
CV %	17,6				
	Caule + Folha				
Baixa acidez	5,12 ^{Aa}	4,90 ^{Aa}	5,47 ^{Aa}	6,13 ^{Aa}	4,93 ^{Aa}
Alta acidez	2,90 ^{Ba}	3,27 ^{Ba}	3,23 ^{Ba}	3,40 ^{Ba}	3,46 ^{Ba}
Gessagem	2,33 ^{Ba}	2,55 ^{Ba}	2,67 ^{Ba}	2,30 ^{Ba}	1,76 ^{Ca}
CV %	18,5				
	Inflorescência				
Baixa acidez	2,50 ^{Aa}	2,47 ^{Aa}	2,51 ^{Aa}	2,40 ^{Aa}	2,02 ^{Aa}
Alta acidez	2,30 ^{Aa}	2,38 ^{Aa}	2,22 ^{ABa}	2,18 ^{ABa}	1,99 ^{Aa}
Gessagem	1,92 ^{Ba}	1,91 ^{Ba}	1,85 ^{Ba}	1,71 ^{Ba}	1,84 ^{Aa}
CV %	13,5				

Letras minúsculas (comparam doses de B) e letras maiúsculas (comparam níveis de acidez) iguais indicam ausência de significância pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Em condição de menor disponibilidade de Mg no solo (Tabela 1), tem-se maior absorção de K (Tabela 6). Esse comportamento analisando-se os três tratamentos de acidez. Contudo, é mais marcante quando da comparação entre os extremos, Baixa acidez ($>$ teor de Ca e Mg no solo) e Gessagem ($>$ teor de Ca; $<$ teor de Mg). Destarte, silogisticamente, pode-se concluir que se ambos têm alto teor de Ca, sendo o Mg divergente, este foi mais importante na redução de absorção de K. O que é corroborado pelos teores de Mg na parte aérea no tratamento com calagem total (Baixa acidez) (Tabela 8). Em adição, a adição de gesso acrescenta SO_4^- ao solo.

A dimensão de teores variou de acordo com o tecido, de modo que se constatou a seguinte ordem: caule + folha $>$ inflorescência $>$ raiz. Esse aspecto da nutrição magnésiana foi semelhantemente registrado por Tyler & Olsson (2001) e, por Silva et al. (2009).

A adubação boratada não influenciou os teores de Fe no tecido de trigo, porém, os tratamentos de acidez do solo propiciaram alteração na raiz e na fração caule + folha (Tabela 9). Na raiz os teores seguiram a seguinte ordem de tratamentos de acidez: Baixa acidez > Alta acidez > Gessagem. Já no caule + folha o tratamento com alta acidez apresentou os maiores teores, exceto na maior dose de B (3,50 mg dm⁻³). Os teores reduzidos de Fe na fração caule + folha com gessagem podem estar relacionados a presença de SO₄⁻, de forma a reduzir a disponibilidade às plantas. Enquanto que na baixa acidez, os reduzidos teores devem-se a menor biodisponibilidade do Fe em condições de pH elevado e menor redução de Fe³⁺ (Marschner et al., 2011; Marschner, 2012).

A raiz teve teores de Fe mais elevados, seguido de caule + folha e inflorescência. Essa reduzida translocação, com acúmulo radicular está de acordo com Tyler & Olsson (2001).

Tabela 9. Teores de Fe (mg kg⁻¹) nos tecidos de raiz, caule + folha e inflorescência de trigo cultivado solo com doses de B e níveis de acidez

Tratamento de acidez	Doses de B (mg dm ⁻³)				
	0	0,15	0,40	1,25	3,50
	Raiz				
Baixa acidez	1300 ^{Aa}	1140 ^{Aa}	1218 ^{Aa}	1065 ^{Aa}	1172 ^{Aa}
Alta acidez	920 ^{Ba}	978 ^{ABa}	618 ^{Ba}	654 ^{ABa}	642 ^{Ba}
Gessagem	443 ^{Ca}	730 ^{Ba}	433 ^{Ba}	730 ^{Ba}	594 ^{Ba}
CV %	24,8				
	Caule + Folha				
Baixa acidez	84 ^{ABa}	74 ^{Ba}	76 ^{Ba}	72 ^{Ba}	72 ^{Aa}
Alta acidez	106 ^{Aa}	102 ^{Aa}	110 ^{Aa}	100 ^{Aa}	88 ^{Aa}
Gessagem	76 ^{Ba}	74 ^{Ba}	75 ^{Ba}	75 ^{ABa}	74 ^{Aa}
CV %	26,8				
	Inflorescência				
Baixa acidez	56	56	61	60	65
Alta acidez	60	60	63	65	59
Gessagem	57 ^{ns}	53	58	58	61
CV %	30,8				

Letras minúsculas (comparam doses de B) e letras maiúsculas (comparam níveis de acidez) iguais indicam ausência de significância pelo teste de Tukey (p < 0,05).

Os teores de Mn nos diferentes tecidos analisados divergiram em função dos fatores níveis de acidez do solo e doses de B (Tabela 10). No que concerne o primeiro, o tratamento com baixa acidez acarretou em menores teores no tecido vegetal. Para o segundo, existiu clara influência apenas na fração caule + folha, onde nos tratamentos Gessagem e Alta acidez a dose de 3,50 mg B dm⁻³ induziu a teores reduzidos.

Em relação a distribuição na planta, raiz e inflorescência tem teores semelhantes, sendo sutilmente maiores no primeiro, ao passo que são inferiores aqueles mensurados na fração caule + folha do trigo. A concentração de Mn em diferentes tecidos vegetais é bastante variável (Tyler & Olsson, 2001; Yang et al., 2009).

Tabela 10. Teores de Mn (mg kg⁻¹) nos tecidos de raiz, caule + folha e inflorescência de trigo cultivado solo com doses de B e níveis de acidez

Tratamento de acidez	Doses de B (mg dm ⁻³)				
	0	0,15	0,40	1,25	3,50
	Raiz				
Baixa acidez	52 ^{Ba}	56 ^{Ba}	50 ^{Ba}	55 ^{Ba}	52 ^{Ba}
Alta acidez	78 ^{Aa}	83 ^{Aa}	80 ^{Aa}	82 ^{Aa}	66 ^{Aa}
Gessagem	63 ^{Aa}	79 ^{ABa}	80 ^{Aa}	75 ^{ABa}	65 ^{Aa}
CV %	19,4				
	Caule + Folha				
Baixa acidez	141 ^{Ca}	114 ^{Ba}	126 ^{Ca}	148 ^{Ba}	118 ^{Ba}
Alta acidez	224 ^{Bab}	235 ^{Aab}	229 ^{Bab}	255 ^{Aa}	212 ^{Ab}
Gessagem	261 ^{Aab}	258 ^{Aab}	272 ^{Aa}	244 ^{Aab}	223 ^{Ab}
CV %	9,4				
	Inflorescência				
Baixa acidez	44 ^{Ba}	38 ^{Ba}	42 ^{Ba}	38 ^{Ba}	52 ^{Aa}
Alta acidez	67 ^{Aa}	66 ^{Aa}	60 ^{Aa}	55 ^{Aa}	54 ^{Aa}
Gessagem	65 ^{Aa}	67 ^{Aa}	64 ^{Aa}	62 ^{Aab}	47 ^{Ab}
CV %	14,4				

Letras minúsculas (comparam doses de B) e letras maiúsculas (comparam níveis de acidez) iguais indicam ausência de significância pelo teste de Tukey (p < 0,05).

Os teores de Cu não diferiram entre doses de B, contudo, para raiz e inflorescência os níveis de acidez foram impactantes (Tabela 11). Em ambos os tecidos, na ausência de adição e com a dose de 0,15 mg B dm⁻³ houve menores teores para o tratamento com baixa acidez. Tanto o efeito da calagem como sua ausência sobre os teores de Cu da parte aérea de poáceas podem ocorrer (Tang et al., 2003; Soratto & Crusciol, 2008). No global, a raiz e a fração caule + folha apresentaram os maiores e menores valores de Cu, em concordância com resultados de Lavado et al. (2001) e, Tyler & Olsson (2001).

Tabela 11. Teores de Cu (mg kg⁻¹) nos tecidos de raiz, caule + folha e inflorescência de trigo cultivado solo com doses de B e níveis de acidez

Tratamento de acidez	Doses de B (mg dm ⁻³)				
	0	0,15	0,40	1,25	3,50
	Raiz				
Baixa acidez	38 ^{Ba}	32 ^{Ba}	45 ^{Aa}	55 ^{Aa}	57 ^{Aa}
Alta acidez	88 ^{Aa}	97 ^{Aa}	69 ^{Aa}	75 ^{Aa}	71 ^{Aa}
Gessagem	55 ^{ABa}	73 ^{ABa}	64 ^{Aa}	59 ^{Aa}	78 ^{Aa}
CV %	33,1				
	Caule + Folha				
Baixa acidez	21	18	20	22	21
Alta acidez	21	16	16	13	19
Gessagem	16 ^{ns}	16	21	16	19
CV %	21,1				
	Inflorescência				
Baixa acidez	17 ^{Ba}	15 ^{Ba}	23 ^{Aa}	20 ^{Aa}	22 ^{Aa}
Alta acidez	32 ^{Aa}	32 ^{Aa}	20 ^{Aa}	23 ^{Aa}	20 ^{Aa}
Gessagem	31 ^{Aa}	36 ^{Aa}	25 ^{Aa}	20 ^{Aa}	23 ^{Aa}
CV %	26,1				

Letras minúsculas (comparam doses de B) e letras maiúsculas (comparam níveis de acidez) iguais indicam ausência de significância pelo teste de Tukey (p < 0,05).

A fração caule + folha de plantas cultivadas em solo com acidez trocável não neutralizada apresentou elevados teores de Zn, em comparação ao tratamento com calagem total (Baixa acidez) (Tabela 12). Esses resultados corroboram com Caires et al. (2001) para soja e Tang et al.(2003) para trigo e cevada, que observaram redução de Zn na parte aérea das

plantas em resposta a calagem. Esse efeito deve estar relacionada a menor biodisponibilidade deste metal em pH do solo mais elevado. Entretanto, o Zn no solo foi alto no tratamento Gessagem, sendo que os demais tratamentos não diferiram (Figura 12). Esse efeito está relacionado com o extrator ácido (Mehlich 1) utilizado na análise de Zn, tendo em vista que extratores ácidos podem não discriminar satisfatoriamente a influência do pH na disponibilidade desse micronutriente (Bataglia & Raij, 1994).

Em relação aos teores na planta como um todo, se registrou amplitude de 21 a 250 mg kg⁻¹, sendo que entre os tecidos teve-se a seguinte sequência: raiz > caule + folha > inflorescência. A distribuição de Zn, com tendência para acúmulo radicular, é corroborante com Lavado et al. (2001) e, Tyler & Olsson (2001).

Tabela 12. Teores de Zn (mg kg⁻¹) nos tecidos de raiz, caule + folha e inflorescência de trigo cultivado solo com doses de B e níveis de acidez

Tratamento de acidez	Doses de B (mg dm ⁻³)				
	0	0,15	0,40	1,25	3,50
	Raiz				
Baixa acidez	101	90	107	176	118
Alta acidez	139	190	185	233	250
Gessagem	109 ^{ns}	166	147	159	166
CV %	50,5				
	Caule + Folha				
Baixa acidez	45 ^{Ba}	36 ^{Ba}	40 ^{Ba}	43 ^{Ba}	50 ^{Ba}
Alta acidez	80 ^{Aa}	80 ^{Aa}	89 ^{Aa}	84 ^{Aa}	85 ^{Aa}
Gessagem	71 ^{Aa}	75 ^{Aa}	80 ^{Aa}	76 ^{Aa}	81 ^{Aa}
CV %	35,5				
	Inflorescência				
Baixa acidez	34	29	31	37	41
Alta acidez	40	45	46	43	45
Gessagem	32 ^{ns}	33	29	21	34
CV %	36,5				

Letras minúsculas (comparam doses de B) e letras maiúsculas (comparam níveis de acidez) iguais indicam ausência de significância pelo teste de Tukey (p < 0,05).

Os teores de elementos nas raízes de trigo e a CTC radicular apresentaram correlações de Pearson somente nos tratamentos com alta e baixa acidez (Tabela 13). Em contraste ao verificado para o tecido radicular, a CTC apresentou correlação de Pearson somente com Zn ($r = -0,63$) na fração caule + folha de plantas cultivadas em solo com correção de acidez a 10 % da recomendação (Tabela 14). Por outro lado, teve correlação com alguns elementos no tecido de inflorescência nas três condições de acidez isoladamente (Tabela 15).

A CTC radicular teve correlações negativas e positivas com nutrientes nos diferentes tecidos vegetais analisados, sendo estas, respectivamente nos tratamentos sem correção da acidez trocável e no tratamento com calagem total. Porém, em nenhuma das situações houve correlação quando se consideraram, em conjunto, os três níveis de acidez, portanto, com maior amplitude de valores das variáveis correlativas. Utilizando maior amplitude se esperaria melhor concatenação entre as variáveis, o que de fato não ocorreu. Bem, cogitasse que as correlações variáveis entre tratamentos (negativas e positivas) sejam decorrentes de fatores *in planta* (diferente força de ligação ao aparato trocador de cátions; efeito de toxidez pelas condições ácidas e B; alta *versus* baixa produção de matéria seca), *ex planta* (disponibilidade dos nutrientes no solo), ou ambos.

Tabela 13. Correlação de Pearson entre teor de elementos em raízes de trigo e CTC radicular

	Baixa acidez	Alta acidez	Gessagem	Todos os níveis de acidez
B	0,28	0,03	0,20	- 0,09
Al	- 0,13	- 0,30	- 0,03	- 0,14
P	- 0,01	- 0,05	0,32	- 0,12
K	- 0,11	- 0,01	- 0,17	- 0,27
Ca	- 0,01	- 0,45*	- 0,09	- 0,16
Mg	- 0,19	- 0,28	- 0,17	0,13
Fe	0,13	- 0,45*	0,06	0,21
Mn	0,22	- 0,44*	0,01	- 0,27
Cu	0,64*	- 0,50*	0,24	- 0,07
Zn	0,50*	- 0,21	0,11	- 0,07

* = $p < 0,01$.

Tabela 14. Correlação de Pearson entre teor de elementos na fração caule + folha de trigo e CTC radicular

	Baixa acidez	Alta acidez	Gessagem	Todos os níveis de acidez
B	0,33	0,19	0,21	0,18
Al	- 0,25	- 0,13	- 0,22	- 0,25
P	0,07	- 0,32	0,34	0,02
K	0,03	- 0,34	0,07	- 0,31
Ca	0,20	- 0,20	0,32	0,28
Mg	0,28	- 0,07	0,01	0,35
Fe	0,04	- 0,12	0,34	- 0,08
Mn	0,30	0,10	0,14	- 0,26
Cu	0,23	- 0,01	0,21	0,24
Zn	0,32	- 0,63*	- 0,01	- 0,32

* = $p < 0,01$.

Tabela 15. Correlação de Pearson entre teor de elementos em inflorescências de trigo e CTC radicular

	Baixa acidez	Alta acidez	Gessagem	Todos os níveis de acidez
B	0,09	0,20	0,19	0,21
Al	0,01	0,09	- 0,08	- 0,22
P	- 0,17	- 0,46*	- 0,12	- 0,06
K	- 0,19	- 0,24	- 0,02	- 0,24
Ca	- 0,11	0,14	- 0,04	- 0,09
Mg	- 0,24	- 0,30	0,12	0,03
Fe	0,23	- 0,43*	- 0,12	0,17
Mn	0,26	0,05	- 0,43	- 0,22
Cu	0,44*	- 0,26	- 0,54*	0,03
Zn	0,30	- 0,41*	- 0,02	0,03

* = $p < 0,01$

4 CONCLUSÃO

Os tratamentos Gessagem e Alta acidez foram prejudiciais para o trigo, com destaque para a condição de Gessagem. Já a aplicação de B apresentou tanto efeito promotor como tóxico ao trigo, sendo o efeito promotor percebido claramente na condição mais extrema de cultivo. As variações no estado nutricional das plantas em resposta a aplicação de B foram pouco pronunciadas, contudo reduziu os teores de Al na fração caule + folha.

5 LITERATURA CITADA

ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. C. G. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (eds.). Fertilidade do solo. Viçosa, SBCS, 2007. p. 645-736.

ANDRADE, L. R. M.; BARROS, L. M. G.; ECHEVARRIA, G. F.; AMARAL, L. I. V.; COTTA, M. G.; ROSSATO, D. R.; HARIDASAN, M.; FRANCO, A. C. Al-hyperaccumulator Vochysiaceae from the Brazilian Cerrado store aluminum in their chloroplasts without apparent damage. *Environmental and Experimental Botany*, 70:37-42, 2011.

ARROYAVE, C.; BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, C.; TOLRÀ, R. Aluminium-induced changes in root epidermal cell patterning, a distinctive feature of hyperresistance to Al in *Brachiaria decumbens*. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 105:1477-1483, 2011.

ASHER, C.J.; OZANNE, P.G. The cation exchange capacity of plants roots, and its relationship to the uptake of insoluble nutrients. *Australian Journal Agricultural Researcher*, 12:755-766, 1961.

BATAGLIA, O. C.; RAIJ, B. van. Eficiência de extratores na determinação da fitodisponibilidade de zinco em solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 18:457-461, 1994.

BELL, R. W. Diagnosis and prediction of boron deficiency for plant production. *Plant and Soil*, 193:149-168, 1997.

BRASIL, E. C.; ALVES, V. M. C.; MARRIEL, I. E.; PITTA, G. V. E.; CARVALHO, J. G. Rhizosphere properties of maize genotypes with contrasting phosphorus efficiency. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35:171-181, 2011.

BROADLEY, M.; BROWN, P.; ÇAKMAK, I.; RENGEL, Z.; ZHAO, F. Functional of nutrients: micronutrients. In: MARSCHNER, P. (ed.). Marschner's mineral nutrition of higher plants. ed. 3. Elsevier, 2012, p. 191-248.

CAIRES, E. F.; FONSECA, A. F.; FELDHAUS, I. C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da soja cultivada no sistema plantio direto em resposta ao calcário e gesso na superfície. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 25:1029-1040, 2001.

CAIRES, E. F.; BLUM, BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 27:275-286, 2003.

CLARK, R. B. Effect of aluminum on growth and mineral elements of Al-tolerant and Al-intolerant corn. Plant and Soil, 47:653-662, 1977.

CHEN, L. S.; QI, Y. P.; JIANG, H. X.; YANG, L. T.; YANG, G. H. Photosynthesis and photoprotective systems of plants in response to aluminum toxicity. African Journal of Biotechnology, 9:9237-9247, 2010.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFSRS/SC. Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10.ed. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul. 2004. 400p.

CRAVO, M. S.; BRAGA, J. M.; AMARAL, F. A. L.; ALVAREZ V, V. H. Efeitos da interação fósforo x enxofre sobre a produção da matéria seca e sobre os níveis críticos de P e S no solo e em plantas de soja (*Glycine max* L.) em solos com e sem calagem. Revista Ceres, 32:12-30, 1985.

CROOKE, W. M. The measurement of the cation-exchange capacity of plants roots. Plant and Soil, 21:43-49, 1964.

CUMMING, J. R.; NING, J. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance aluminium resistance of broomsedge (*Andropogon virginicus* L.). Journal of Experimental Botany, 54:1447-1459, 2003.

GAHOONIA, T. S.; NIELSEN, N. E.; JOSHI, P. A.; JAHOR, A. A root hairless barley mutant for elucidating genetic of root hairs and phosphorus uptake. Plant Soil, 235:211-219, 2001.

GEORGE, E.; HORST, W. J.; NEUMANN, E. Adaptations of plants to adverse chemical soil conditions. In: MARSCHNER, P. (ed.). Marschner's mineral nutrition of higher plants. Ed. 3. Elsevier, 2012, p. 409-472.

GODO, G. H.; REISENAUER, H. M. Plant effects on soil manganese availability. Soil Science Society of American Journal, 44:993-995, 1980.

GOLDBERG, S. Reactions of boron with soils. Plant and Soil, 193:35-48, 1997.

GOLBERG, S.; SHOUSE, P. J.; LESCH, S. M.; GRIEVE, C. M.; POSS, J. A.; FORSTER, H. S.; SUAREZ, D. L. Effect of high boron application on boron content and growth of melons. Plant Soil, 256:403-411, 2003.

HAYNES, R. J.; LUDECKE, T. E. Yield, root morphology and chemical composition of two pasture legume as affected by lime and phosphorus applications to an acid soil. Plant Soil, 62:241-254, 1981.

HINSINGER, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affect by root-induced chemical changes: a review. Plant Soil, 237:173-195, 2001.

HINSINGER, P.; BENGOUGH, A. G.; VETTERLEIN, D.; YOUNG, I. M. Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. Plant Soil, 321:117-152, 2009.

HORST, W. J.; WANG, Y.; ETICHA, D. The role of the root apoplast in aluminium-induced inhibition of root elongation and in aluminium resistance of plants: a review. Annals of Botany, 106:185-197, 2010.

HOSSAIN, A. K. M. Z.; ASGAR, A.; HOSSAIN, M. A.; TOSAKI, T.; KOYAMA, H.; HARA, T. Boron-calcium synergically alleviates aluminum toxicity in wheat plants (*Triticum aestivum* L.). Soil Science and Plant Nutrition, 51:43-49, 2005.

JANSEN, S.; WATANABE, T.; DESSEIN, S.; ROBBRECHT, E.; SMETS, E. The evolution of aluminium accumulation in angiosperms. In: HEMSLEY, A. R. (ed). The evolution of plant physiology. 467-479, 2004.

JIANG, H. X.; TANG, N.; ZHENG, J. G.; CHEN, L. S. Antagonistic actions of boron against inhibitory effects of aluminum toxicity on growth, CO₂ assimilation, ribulo-1,5-biphosphate carboxylase/oxygenase, and photosynthetic electron transport probed by the JIP-test, of *Citrus grandis* seedlings. BioMed Central Plant Biology, 9:102, 2009.

KELTJENS, W. G. Magnesium uptake by Al-stressed maize plants with special emphasis on cation interactions at root exchange sites. Plant and Soil 171:141-146, 1995.

LAVADO, R. S.; PORCELLI, C. A.; ALVAREZ, R. Nutrient and heavy metal concentration and distribution in corn, soybean and wheat as affect by different tillage systems in Argentine Pampas. *Soil & Tillage Research*, 62:55-60, 2001.

LIMA FILHO, O. F.; MALAVOLTA, E. Sintomas de desordens nutricionais em estévia *Stevia rebaudiana* (Bert.) Bertoni. *Scientia Agricola*, 54:53-61, 1997.

LEITE, R. A. Uso de matrizes experimentais e de modelos estatísticos no estudo do equilíbrio fósforo-enxofre na cultura da soja em amostras de Latossolos de Minas Gerais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1984. 62 p. (Dissertação de Mestrado).

LENOBLE, M. E.; BLEVINS, D. G.; MILES, R. J. Prevention of aluminum toxicity with supplemental boron. II. Stimulation of root growth in acidic, high aluminum subsoil. *Plant, Cell and Environment*, 19:1143-1148, 1996.

LEWIS, D. H.; QUIRK, J. P. Phosphate diffusion in soil and uptake by plants. III. ^{31}P movement and uptake by plants as indicated by ^{32}P autoradiography. *Plant and Soil*, 27: 445-453, 1967.

MARQUES, R.; MOTTA, A. C. V. Análise química do solo para fins de fertilidade. In: LIMA, M. R. de., ed. Manual de diagnóstico da fertilidade e manejo dos solos agrícolas. 2.ed. Curitiba, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, 2003. p. 81-102.

MARSCHNER, P.; CROWLEY, D.; RENGEL, Z. Rhizosphere interactions between microorganisms and plants govern iron and phosphorus acquisition along the root axis – model and research methods. *Soil Biology and Biochemistry*, 43:883-894, 2011.

MARSCHNER, P. Rhizosphere biology. In: MARSCHNER, P. (ed.). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Ed. 3. Elsevier, 2012, p. 369-388.

MARTINS, A. P. L.; REISSMANN, C. B. Material vegetal e as rotinas laboratoriais nos procedimentos químico-analíticos. *Scientia Agraria*, 8:1-17, 2007.

MATTIELLO, E. M.; RUIZ, H. A.; SILVA, I. R.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L.; BEHLING, M. Transporte de boro no solo e sua absorção por eucalipto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33:1281-1290, 2009.

MOTTA, A. C. V.; SERRAT, B. M.; REISSMANN, C. B.; DIONÍSIO, J. A. Micronutrientes na rocha, no solo e na planta. Curitiba: Edição dos autores. Universidade Federal do Paraná. 2007. 246 p.

NEUMANN, G.; RÖMHELD, V. Rhizosphere chemistry in relation to plant nutrition. In: MARSCHNER, P. (ed.). Marschner's mineral nutrition of higher plants. Ed. 3. Elsevier, 2012, p. 347-368.

NOGUEIRA, M. A. Interações entre micorriza arbuscular, rizobactérias, fósforo e silício na manifestação da toxidez de manganês em soja. Tese (Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 195 p. 2001.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399 p.

OLIVARES, E.; PEÑA, E.; MARCANO, E.; MOSTACERO, J.; AGUIAR, G.; BENÍTEZ, M.; RENGIFO, E. Aluminum accumulation and its relationship with mineral plant nutrients in 12 pteridophytes from Venezuela. *Environmental and Experimental Botany*, 65:132-141, 2009.

PEGORARO, R. F.; SANTOS NETO, J. A.; SILVA, I.R.; FONTES, R. L. F.; FARIA, A. F.; MOREIRA, F. F. Crescimento de soja em solos em resposta a doses de boro, calagem e textura do solo. *Ciência e Agrotecnologia*, 32:1092-1098, 2008.

POSCHENRIEDER, C.; GUNSE, B.; CORRALES, I.; BARCELÓ, J. A glance into aluminum toxicity and resistance in plants. *Science of the total Environment*, 400:356-368, 2008.

RAY, J. G.; GEORGE, K. J. Cation exchange capacity of roots of wild grasses and the ecological implications. *Екологія та ноосферологія*, 22:58-72, 2011.

REID, R. Update on boron toxicity and tolerance in plants. In: XU, F.; GOLDBACH, H. E.; BROWN, P. H.; BELL, R. W.; FUJIWARA, T.; HUNT, C. D.; GOLDBERG, S.; SHI, L. (eds.). *Advances in plant and animal boron nutrition*. Springer: Dordrecht, p. 83-90, 2007.

SERRANO, H. C.; PINTO, M. J.; MARTINS-LOUÇÃO, M. A.; BRANQUINHO, C. How does an Al-hyperaccumulator plant respond to a natural field gradient of soil phytoavailable Al?. *Science of the Total Environment*, 409, 3749-3756, 2011.

SHEN, R.; MA, J. F. Distribution and mobility of aluminium in an Al-accumulating plant, *Fagopyrum esculentum* Moench. *Journal of Experimental Botany*, 52:1683-1687, 2001.

SILVA, C. A.; VALE, F. R. Disponibilidade de nitrato em solos brasileiros sob efeito da calagem e de fontes e doses de nitrogênio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35:2461-2471, 2000.

- SILVA, I. R.; CORRÊA, T. F. C.; NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; RUFTY, T.; SILVA, E. F.; GEBRIM, F. O.; NUNES, F. N. Timing, location and crop species influence the magnitude of amelioration of aluminum toxicity by magnesium. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33:65-76, 2009.
- SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Nutrição e produtividade de grãos da aveia-preta em função da aplicação de calcário e gesso em superfície na implantação do sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:715-725, 2008.
- SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (eds). *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 206-268, 2007.
- STASS, A.; KOTUR, Z.; HORST, W. J. Effect of boron on the expression of aluminium toxicity in *Phaseolus vulgaris*. *Physiologia Plantarum*, 131:283-290, 2007.
- TANG, C.; RENGEL, Z.; DIATLOFF, E.; GAZEY, C. Responses of wheat and barley to liming on a sandy soil with subsoil acidity. *Field Crops Research*, 80:235-244, 2003.
- TAO, S.; CHEN, Y. J.; XU, F. L.; CAO, J.; LI, B. G. Changes of Cooper speciation in maize rhizosphere soil. *Environmental Pollution*, 122:447-454, 2003.
- TAYLOR, G. J.; MACFIE, S. M. Modeling the potential for boron amelioration of aluminum toxicity using the Weibull function. *Canadian Journal of Botany*, 72:1187-1196, 1994.
- TURPAULT, M. P.; UTÉRANO, C.; BOUDOT, J. P.; RANGER, J. Influence of mature Douglas fir roots on the solid soil phase of the rhizosphere and its solution chemistry. *Plant Soil*, 275:327-336, 2005.
- TYLER, G.; OLSSON, T. Plant uptake of major and minor mineral elements as influenced by soil acidity and liming. *Plant Soil*, 230:307-321, 2001.
- VALLE, S. R.; CARRASCO, J.; PINOCHET, D.; CALDERINI, D. F. Grain yield, above-ground and root biomass of Al-tolerant and Al-sensitive wheat cultivars under different soil aluminum concentrations at field conditions. *Plant and Soil*, 318:299-310, 2009.
- VETTERLEIN, D.; JAHN, R.; Gradients in soil solution composition between bulk soil and rhizosphere-In situ measurement with changing soil water content. *Plant Soil*, 258:307-317, 2004.

von UEXKÜLL, H. R.; MUTERT, E. Global extent, development and economic impact of acid soils. *Plant and Soil*, 171:1-15, 1995.

WANG, Y. The role of silicon, boron and pH-dependent aluminium speciation in solution on aluminum toxicity in maize (*Zea mays* L.). University Hannover, Germany. 101 p. 2004. (Doctoral thesis).

WANG, Z. Y.; KELLY, J. M.; KOVAR, J. L. Depletion of macro-nutrients from rhizosphere soil solution by juvenile corn, cottonwood, and switchgrass plants. *Plant Soil*, 270:213-221, 2005.

WEHR, J. H.; BLAMEY, F. P. C.; MENZIES, N. W. Comparison between methods using copper, lanthanum, and colorimetry for the determination of the cation exchange capacity of plant cell walls. *Journal of Agricultural and Chemistry*, 58:4554-4559, 2010.

WHITE, P. J. Ion uptake mechanisms of individual cells and roots: short-distance transport. In: MARSCHNER, P. (ed.). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Ed. 3. Elsevier, 2012, p. 7-47.

YANG, Z. B.; YOU, J. F.; XU, M. Y.; YANG, Z. M. Interaction between aluminum toxicity and manganese toxicity in soybean (*Glycine max*). *Plant Soil*, 319:277-289, 2009.

YU, M.; SHEN, R.; XIAO, H.; XU, M.; WANG, H.; WANG, H.; ZENG, Q.; BIAN, J. Boron alleviates aluminum toxicity in pea (*Pisum sativum*). *Plant Soil*, 314:87-98, 2009.

XU, M. L.; LIU, Z. Y. Thenutrient status of soil-root interface II. The accumulation and depletion of potassium. *Acta Pedologica Sinica*, 20:295-302, 1983. (Em chinês com sumário em ingles).

ZHENG, S. J.; LIN, X.; YANG, J.; LIU, Q.; TANG, C. The kinetics of aluminum adsorption and desorption by root cell walls of aluminum resistant wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivar. *Plant Soil*, 261:85-90, 2004.

CAPÍTULO 3 – INTERAÇÃO B/AL EM MILHO: IMPACTO SOBRE ATRIBUTOS BIOMÉTRICOS, AQUISIÇÃO DE NUTRIENTES, SENSIBILIDADE DE MÉTODOS DE ANÁLISE DE CTC RADICULAR E ANÁLISE FOLIAR

RESUMO

O alumínio (Al) limita o crescimento de plantas em solos muito ácidos, tanto no sistema radicular como na parte aérea das plantas. Em geral, o sintoma característico é a redução do sistema radicular, que decorre da sensibilidade dos meristemas apicais e do acúmulo preferencial do Al na raiz. Diferentes vias têm sido investigadas para a amenização dessa toxidez, entre elas a nutricional. O micronutriente boro (B) por ser fundamental para o crescimento meristemático vem sendo estudado em interação com o Al. Foram avaliados seis tratamentos na solução nutritiva (3 x 2): três níveis de B (0, 50 e 200 μM) e dois de Al (0 e 300 μM). As determinações foram: (I) o impacto sobre atributos de produção, qualidade de raízes e metabolismo vegetal; (II) o efeito sobre a aquisição de nutrientes; (III) a sensibilidade de diferentes métodos de análise da capacidade de troca de cátions (CTC) da raiz; (IV) o impacto sobre o tecido foliar de plantas de milho (*Zea mays* L.). A condição de toxidez por Al depreciou a produção de matéria seca, a qualidade de raízes, a aquisição de nutrientes e o metabolismo do milho, contudo, o B não amenizou estes sintomas. Tanto a adição de B como de Al diminuem a CTC radicular. Os métodos de análise de CTC radicular (Adsorção catiônica e Delta pH 11) que tem o tecido radicular padronizado com solução de HCl 0,05 mol L⁻¹ foram mais eficientes. Contudo, o método Delta pH apresentou com mais clareza o efeito do Al e do B, além de ser mais prático e de menor custo. A análise foliar através de imagens digitais, do equipamento N tester, da cartilha de Münssell, de pigmentos foliares e dos teores de C e N demonstrou eficientemente o efeito da toxidez por Al. A adição de B aumenta o teor de clorofilas enquanto o Al reduz.

Palavras-Chave: nutrição de plantas, toxidez por Al, imagem digital, pigmentos foliares.

CHAPTER 3 – INTERACTION B/Al ON MAIZE: IMPACT ON BIOMETRIC ATTRIBUTES, NUTRIENTS ACQUISITION, METHODS SENSIBILITY FOR ROOT CATION EXCHANGE CAPACITY AND LEAF ANALYSIS

ABSTRACT

The element aluminum (Al) limits plants development for very acid soil, diminishing both roots and shoots growth. The root apical meristems was well know to be the more sensitive root part to Al toxicity. Also, the Al preferential accumulates in the root and can cause structural and biochemical change on it. In contrast boron (B) is essential for root meristematic growth, consequently may interact with Al. So, the experiment goal was to research maize (*Zea mays* L.) growth under different concentration B and Al in nutrient solution. Maize seedling were cultivated under six treatments (3 x 2) were tested for nutritive solution: three B rates (0, 50 and 200 μM) and two Al rates (0, 300 μM). It was determined: (I) the impact on production attributes, root system and plant metabolism, (II) the effect on nutrient acquisition, (III) the sensitivity of different methods (titration, extraction cation, adsorption cationic and Delta pH 11) of analysis of cation exchange capacity root (CEC), (IV) the impact on leaf tissue from corn plants. The condition of Al toxicity depreciated the dry matter yield, quality of the root system, the acquisition of nutrients and metabolism of maize, however, the B failed to alleviate these symptoms. Both the addition of B to Al decreases the CEC root. Two methods showed to be more promising (adsorption cationic and Delta pH 11) and both used as root pretreated HCl solution 0.05 mol L⁻¹. However, the method Delta pH showed more clearly the effect of Al and B, as well as being more practical and less expensive. The leaf analysis through digital imaging, equipment N tester, the primer Münsell, pigments and C and N concentration were effectively demonstrated the effect of Al toxicity. However, B increased chlorophyll when Al decreased its concentration.

Key-Words: plant nutrition, Al toxicity, digital image, leaf pigments.

1 INTRODUÇÃO

A toxidez por Al e a deficiência do micronutriente B são comumente relatados como incidentes sobre diferentes espécies de plantas cultivadas em solos ácidos (Camargo et al., 1980; Shorrocks, 1997; Valle et al., 2009). Contudo, vale salientar que: (1) a condição alumino-tóxica não é geral para estes solos, sendo corrente apenas em pH menor que 5,5 e acidez trocável (Al^{3+}) elevada (Motta et al., 2009; Valle et al., 2009); (2) em solos ácidos a adsorção de B no solo é reduzida (Goldberg, 1997), assim, potencialmente lixiviável em regiões úmidas (Motta et al., 2007); em adição, a exigência é maior em situações de deficiências hídrica, térmica e de pressão de vapor ou excesso de luz (Bell, 1997).

A ação tóxica do Al em espécies sensíveis, como as poáceas milho (*Zea mays* L.) e aveia branca (*Avena sativa* L.), é inicialmente perceptível no sistema radicular (Clark, 1977; Radmer et al., 2012). Investigações apontam para a alteração na parede celular, membrana plasmática e núcleo, de maneira que a divisão e alongação celular são prejudicadas (Tabuchi & Matsumoto, 2001; Ahn et al., 2002; Silva et al., 2000). Usando técnicas para o crescimento diferencial de raízes, Sivaguru & Horst (1998) demonstraram que a toxicidade por Al^{3+} na região de 1-2 mm do ápice, afeta a zona de crescimento radicular (2,5-5 mm do ápice) de maneira semelhante à toxicidade na raiz inteira. Apesar da região mais próxima do ápice não contribuir significativamente para o alongamento radicular, esta regula a sinalização do hormônio vegetal auxina para as regiões de crescimento mais ativo (Kollmeier et al., 2000). Em paralelo, verifica-se inibição do crescimento da parte aérea (Pereira et al., 2008), o que demonstra menor capacidade de aquisição de bens naturais (água, nutrientes, luz e CO_2). Devido ao efeito rizotóxico, a absorção de nutrientes e água é limitada, o que também reduz o crescimento vegetal aéreo (Clark, 1977; Freitas et al., 2006). Destaca-se aqui, que apesar de ser retido com intensidade na parede celular das células radiculares (Yang et al., 2008), o Al atinge a parte aérea das plantas em pequenas quantidades (Silva et al., 2008; Silva et al., 2009). Assim, o metabolismo na parte aérea pode ser duplamente prejudicado, pela carência de bens naturais ou pela toxidez ao metabolismo de órgãos aéreos (Chen et al., 2010).

A carência de B induz impacto negativo sobre os tecidos meristemáticos radiculares, onde ocorre o espessamento e fragilização da parede celular, o que por sua vez prejudica a divisão e alongação celular (Sommer & Sorokin, 1928; Moraes-Dallaqua, 2000). Nessa ótica o B é tão importante, que apesar de variar entre espécies e órgãos vegetais, cerca 50-98 % de

seu conteúdo nas plantas ocorre associado a parede celular (Loomis & Durst, 1992; Goldbach, 1997). Adicionalmente, ocorre alteração no metabolismo das auxinas, na síntese de ácidos nucleicos e na integridade da membrana plasmática, de maneira que o crescimento radicular é inibido (Taiz & Zeiger, 2002). Não obstante, ocorrem similarmente prejuízos ao crescimento da parte aérea, sendo que estes variam com a intensidade de deficiência e com o estágio de desenvolvimento vegetal (Wang et al., 2003; Broadley et al., 2012). Assim, durante qualquer momento a deficiência pode causar a morte da planta ou redução de crescimento, caso isso não ocorra, a qualidade das sementes pode ainda ser prejudicada (Dordas et al., 2006; Broadley et al., 2012).

O botânico Ernst Münch distinguiu sabiamente a planta em dois compartimentos: o *morto*, denominado de apoplasto e o *vivo*, denominado de simplasto. O apoplasto é o sistema de paredes celulares, espaços intercelulares e vasos do xilema, enquanto que o simplasto é considerado como todo o citoplasma e membranas. Assim, basicamente passando do *morto* para o *vivo* é que a vida acontece (Fernandes & Souza, 2006). Não tudo, ressalta-se que a capacidade de troca de cátions (CTC) radicular é um atributo do sistema *morto*, com destaque para a parede celular.

A parede celular consiste em fibras de celulose unidas por feixes de glicanas e glicoproteínas, todos envolvidos por uma matriz péctica, sendo que além do B, Ca também é um componente intrínseco, com adicional impregnação silícica (White, 2012). Em adição, a organização da parede celular permite a formação de poros com diâmetro próximo de 3 a 5 nm e, comprimento em torno de 100 a 200 nm (Fernandes & Souza, 2006). Meychik & Yermakov (1999) separaram os principais grupos de troca iônica da parede celular de raízes em: amina, carboxil de ácidos galacturônicos, carboxil de segunda espécie e fenol. Por fim, para que os nutrientes fomentem a vida (absorção celular – simplasto) estes precisam primeiro se aproximar da membrana plasmática, de maneira que a capacidade de troca iônica da parede celular representa as forças de atração e retenção.

O aparato trocador de íons tem sido tema de diversos estudos (Horst et al., 2007). No campo das espécies vegetais a principal distinção é entre as famílias *Poaceae* e *Fabaceae*, que apresentam respectivamente, reduzida e elevada CTC radicular (Asher & Ozanne, 1961). Não obstante, os autores registraram com canola - *Brassica napus* L. (*Brassicaceae*) os maiores valores 344 $\mu\text{mol g}^{-1}$. No campo dos métodos, têm-se análises por extração e adsorção de cátions (Amory & Dufey, 1984; Keltjens, 1995; Meychik & Yermakov, 2001), microanálises

por raio X (Fritz, 2007) e por corantes catiônicos (Wehr et al., 2010). Por outro lado, o campo com certa carência de pesquisas é aquele que abrange os fatores nutricionais que têm potencial de impacto sobre a CTC, principalmente em raízes inteiras. Avaliando o efeito do N na CTC radicular de 20 espécies (graníferas, pastagens e ervas), Asher & Ozanne (1961) constataram que a resposta depende do nível do nutriente e do tipo de planta. Assim, milho e trigo tem alta CTC quando cultivadas em alto nível de N, enquanto que em canola e tomateiro esse efeito é inverso. Colzi et al. (2012) registraram que a espécie *Silene paradoxa* L. tem alta e baixa quantidade de pectinas na parede celular de raízes quando do suprimento de Cu, em biótipo retirado de solo não contaminado e contaminado, respectivamente. Por outro lado, Wang et al. (2003) observaram que a carência ou a toxidez de Mn altera os componentes das substâncias pécicas da parede celular em genótipos de tabaco (*Nicotiana tabacum* L.). Em suma, as alterações decorrentes da nutrição das plantas sobre a CTC de raízes tem ainda campo para investigação.

A semelhança entre sintomas decorrentes de Al-toxidez e B-deficiência tem despertado o interesse para a interação B/Al. LeNoble et al. (1996a, b) demonstraram a redução da toxidez radicular induzida por Al quando o B foi adicionado em concentrações acima da faixa normal, em condições hidropônicas com abóbora (*Cucurbita pepo* L.) e em solo com alfafa (*Medicago sativa* L.). Pesquisas recentes demonstram amenização de alguns sintomas da toxidez por Al, quando da adição de B em porta-enxertos de maçã – *Malus* sp. (Wojcik, 2003), girassol – *Helianthus annuus* L. (Ruiz et al., 2006), feijão – *Phaseolus vulgaris* L. (Stass et al., 2007), pepino – *Cucumis sativus* L. e milho (Corrales et al., 2008), ervilha – *Pisum sativum* L. (Yu et al., 2009) e pomelo – *Citrus grandis* L. (Jiang et al., 2009).

No prisma da interação B/Al este experimento objetivou avaliar: (I) o impacto sobre atributos de produção, qualidade de raízes e metabolismo vegetal; (II) o efeito sobre a aquisição de nutrientes; (III) a sensibilidade de diferentes métodos de análise da CTC da raiz; (IV) o impacto sobre o tecido foliar de plantas de milho.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CONDUÇÃO EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido em casa de vegetação (novembro 2012), no Departamento de Solos e Engenharia agrícola da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba.

Sementes de milho (híbrido simples DKB 350; tolerante ao Al) foram germinadas em areia lavada umedecida com água deionizada. Plântulas (4 plântulas) com três dias de emergência foram fixadas em poliestireno expandido, que foi transferido para vasos plásticos de 1,5 L contendo solução (continuamente aerada pH 4,3) com composição de 1/5 da proposta por Hoagland & Arnon (1950). Transcorrido um dia após o transplante (DAT) foram adicionados 0, 50 e 200 μM de B (ácido bórico) e, 0 e 300 μM de Al (AlCl_3) na solução nutritiva, com quatro repetições para cada tratamento e em esquema fatorial.

2.1.1 Coleta de dados

Transcorridos 12 DAT foram adicionados dois vasos sem plantas. Os vasos com e sem plantas foram pesados vazios e contendo solução nutritiva. Alíquotas de 30 mL da solução que recebeu a adição de B e Al foram coletadas no tempo zero e após 24 h, sendo que estas foram filtradas em papel filtro e acondicionadas em frascos de plásticos a 4 °C. Antes da coleta após 24 h de teste, os vasos foram novamente pesados. Posteriormente, a solução nutritiva foi substituída, dessa vez, com ausência dos tratamentos de B e Al, sendo a coleta de alíquotas conduzida como supradescrito. Através da diferença de massa de água dos vasos contendo plantas (evapotranspiração) e aqueles sem plantas (evaporação) foram alcançados dados de transpiração. Nas alíquotas de solução nutritiva determinaram-se: N-NH_4^+ - espectrometria UV/VIS (fenato); K – espectrometria de emissão por chama; P – espectrometria UV/VIS (amarelo vanadato); Ca, Mg, Fe, Mn, Cu e Zn – espectrometria de emissão atômica. Com base na diferença entre o conteúdo inicial da solução nutritiva e o conteúdo final determinou-se a depleção de nutrientes no período de 24 h.

Aos 14 DAT as plantas de milho foram retiradas da solução nutritiva, sendo colocadas dentro de sacos de plástico e acondicionadas a 4° C. A partir deste instante, foram obtidas imagens digitais (com luz da câmera – *flash*) das plantas inteiras. Para tanto, utilizou-se

câmera Kodak AF 3x OAL 10,2 megapixels, fixada num suporte de plástico com formato circular e com orifícios na posição da lente e da fonte de luz da câmera; este conjunto por sua vez foi fixado num tripé de metal com base circular (sustentando suporte/câmera). A distância entre a superfície do papel e a lente da câmera durante a obtenção das imagens foi de 60 cm.

As plantas foram então separadas em raízes e parte aérea. As raízes foram lavadas em água deionizada (imersão 15 segundos, posteriormente água corrente), secas em papel toalha e mensuradas quanto a massa. O sistema radicular proveniente de uma planta por unidade experimental foi conservado em etanol 60 %. As demais raízes e a parte aérea (exceto a segunda folha verdadeira do milho) das plantas foram submetidas à estufa com ventilação forçada de ar a 65 °C por 72 h. Posteriormente, foi determinada a matéria seca de raízes e parte aérea de milho.

Foram obtidas imagens digitais da face adaxial da segunda folha das plantas conforme metodologia proposta por Karcher & Richardson (2003) e adaptada para as condições deste experimento. Dentro de sala de laboratório iluminado por luzes fluorescentes, as folhas foram dispostas sobre folha de papel A4 (cor branca) e captadas digitalmente (câmera no conjunto câmera digital/suporte plástico/tripé – supradescrito) com luz do equipamento acionada. A distância entre a superfície do papel e a lente da câmera durante a obtenção das imagens foi de 30 cm. As imagens foram acessadas com o programa *Paint* (formato *Paintbrush* para *Windows*), onde foram recortados cinco retângulos do limbo foliar (40 x 140 pontos), sendo estes unidos como uma imagem composta no programa *Microsoft Powerpoint*. Esta imagem foi acessada com o programa *Corel Photo Paint X3* e com auxílio da ferramenta Histograma, obtiveram-se os componentes *red*, *green* e *blue* (RGB). A média de cada componente e a média total foi tabulada em planilha *Excel Windows*, onde foram utilizados para alcançar os valores do matiz da cor verde, saturação, brilho e índice de cor verde escuro (ICVE) de acordo com equações propostas por Karcher & Richardson (2003). Nas mesmas folhas efetuaram-se leituras com o medidor portátil de clorofila N-tester e comparação cromática (cartilha de Münsell para tecidos vegetais). Em seguida, aproximadamente 0,2 g de material foliar fresco foram macerados, juntados a 10 mL de acetona 80 % e filtrados em papel filtro de filtragem lenta, sendo, aos extratos finais, adicionados mais 10 mL de solução de acetona. Os extratos foram analisados quanto à absorbância nos comprimentos de onda de 663, 645 e 470 nm utilizando espectrofotômetro UV/VIS. Com os valores de absorbância foram calculados os teores de clorofila *a* e clorofila *b* (Arnon, 1949) e de carotenoides totais

(Lichtenthaler & Wellburn, 1983). Para a extração de antocianinas totais cerca de 0,2 g de material foliar fresco foi incubado com 2 mL de solução metanol/HCl/água (90:1:1 v/v) por 24 h a 4° C na ausência de luz. Posteriormente, determinou-se o teor de antocianinas totais através de cálculos envolvendo a absorbância dos extratos nos comprimentos de onda de 653 e 530 nm obtidos com espectrofotômetro UV/VIS (Murray & Hackett. 1991). Por fim, o restante das folhas foi seco em estufa por 48 h por 65 °C e posteriormente, analisadas quanto ao teor de C e N (via seco, analisador elementar Vario EL III).

As raízes armazenadas em etanol foram escaneadas e com o auxílio do programa *Winrhizo* alcançaram-se os valores dos atributos comprimento, área superficial e volume. Estas raízes foram submetidas a secagem e obtenção de massa como supradescrito, o que possibilitou a extrapolação dos valores dos atributos radiculares em função do total de matéria seca de raízes por unidade experimental.

O tecido de raiz seco em estufa foi moído em gral de porcelana e analisado quanto à CTC por diferentes metodologias. (1) Método do KCl pH 7 (Crooke, 1964): 50 mg de tecido radicular foram agitados por 5 minutos com 100 mL de solução de HCl 0,01 mol L⁻¹; transcorrido o período, o tecido foi retido em papel filtro e retirado o excesso de HCl com água deionizada; em seguida, o material foi agitado por 5 minutos com 100 mL de solução de KCl 1 mol L⁻¹ (pH 7,0); transcorrido o período, o tecido foi retido em papel filtro e no extrato foi adicionado KOH 0,01 mol L⁻¹ até o pH da solução retornar a 7,0; a quantidade de base adicionada foi considerada correspondente a CTC da raiz. (2) Método da Extração catiônica: 50 mg de tecido radicular foram agitados por 2 horas com 20 mL de solução de HCl 0,05 mol L⁻¹; transcorrido o período, o tecido foi retido em papel filtro e os extratos armazenados em frascos de plástico a 4 °C; posteriormente, determinaram-se os teores dos nutrientes catiônicos Ca, Mg, Fe, Mn, Cu e Zn (espectrometria de absorção atômica), em adição, K (espectrometria de emissão por chama) e P (espectrometria UV-VIS, amarelo-vanadato) foram determinados nos extratos; a CTC radicular foi correspondente ao somatório dos cátions extraídos (exceto K). (3) Método da Adsorção catiônica: procedeu-se como para a extração catiônica; posteriormente o material retido em papel filtro foi agitado por 2 horas com 20 mL de solução composta por 1,0; 1,0; 0,2; 0,2; 0,2 e 0,2 mg L⁻¹ de Ca, Mg, Fe, Mn, Cu e Zn, respectivamente; transcorrido o período, o tecido foi retido em papel filtro e os extratos armazenados em frascos de plástico a 4 °C; posteriormente foram determinados os cátions da solução mista supradescrita, utilizando espectrometria de absorção atômica; a CTC

radicular correspondeu a quantidade total de cátions adsorvidos pelo tecido de raiz. (4) Método do Delta pH 11: procedeu-se como para a extração catiônica; posteriormente o material retido em papel filtro foi agitado por 2 horas com 20 mL de solução KOH pH 11; transcorrido o período, o tecido radicular foi retido em papel filtro e nos extratos foi determinado o pH; a CTC radicular correspondeu a diferença entre a concentração de íons H^+ na solução de equilíbrio e a concentração inicial, obtido pela medição de pH, conforme Meychik et al. (2005). Os métodos 2, 3 e 4 foram baseados em Wu & Hendershot (2009), contudo, se substituiu matéria fresca por matéria seca e se reduziu o tempo de contato raiz/solução nas análises.

2.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) seguindo um delineamento inteiramente casualizado com arranjo fatorial dos tratamentos (três níveis de B x dois níveis de Al), com quatro repetições. Para a análise dos dados foi utilizado o teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade, correlações de Pearson e agrupamento de componentes principais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ASPECTOS VISUAIS, PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA E TRANSPIRAÇÃO

Sobre os aspectos visuais, se evidenciou o efeito da adição de 300 μM de Al na solução nutritiva, que repercutiu de maneira tóxica, uma vez que tanto o crescimento da parte aérea como o sistema radicular foram peremptoriamente reduzidos (Figura 1). As folhas mais velhas das plantas de milho apresentaram clorose/necrose na condição tóxica, sendo que esses sintomas foram sutilmente mais claros na ausência de suplementação boratada.

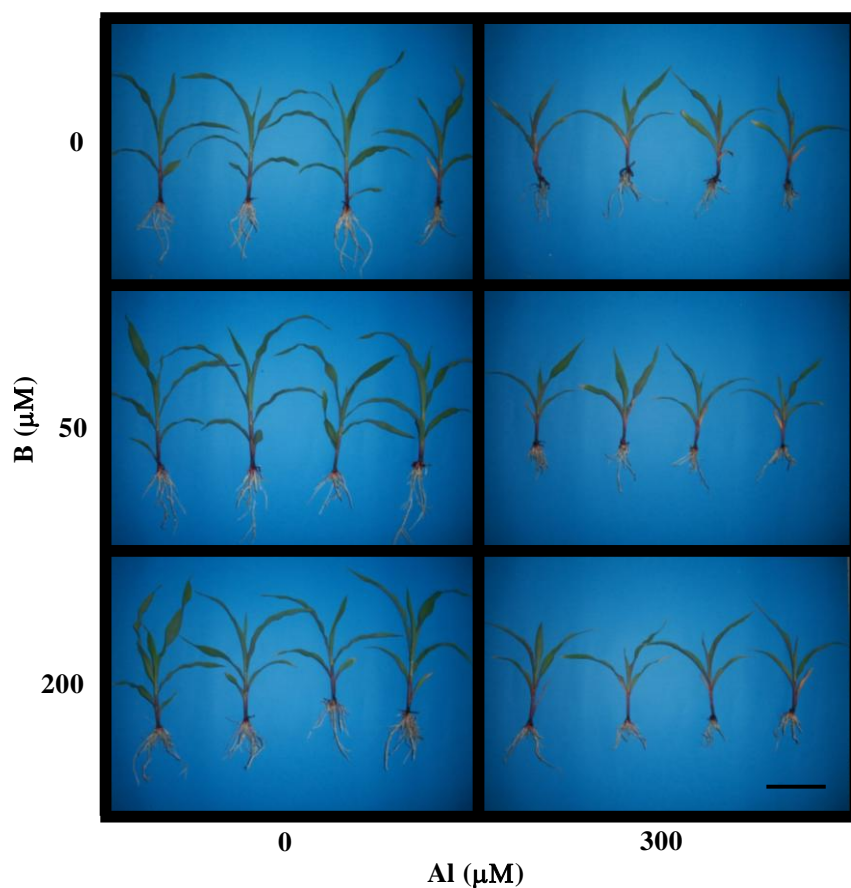


Figura 1. Aspectos visuais de plantas de milho em resposta a variação do nível de B e Al em solução nutritiva. Barra = 10 cm.

A produção de matéria seca da parte aérea e da raiz e a relação matéria seca parte aérea/raiz em plantas de milho variou em função dos tratamentos de B e Al (Figura 2). A maior alocação de matéria seca na parte aérea ocorreu quando, em condição atóxica se aplicaram 50 μM de B, ao passo que com 200 μM houve redução.

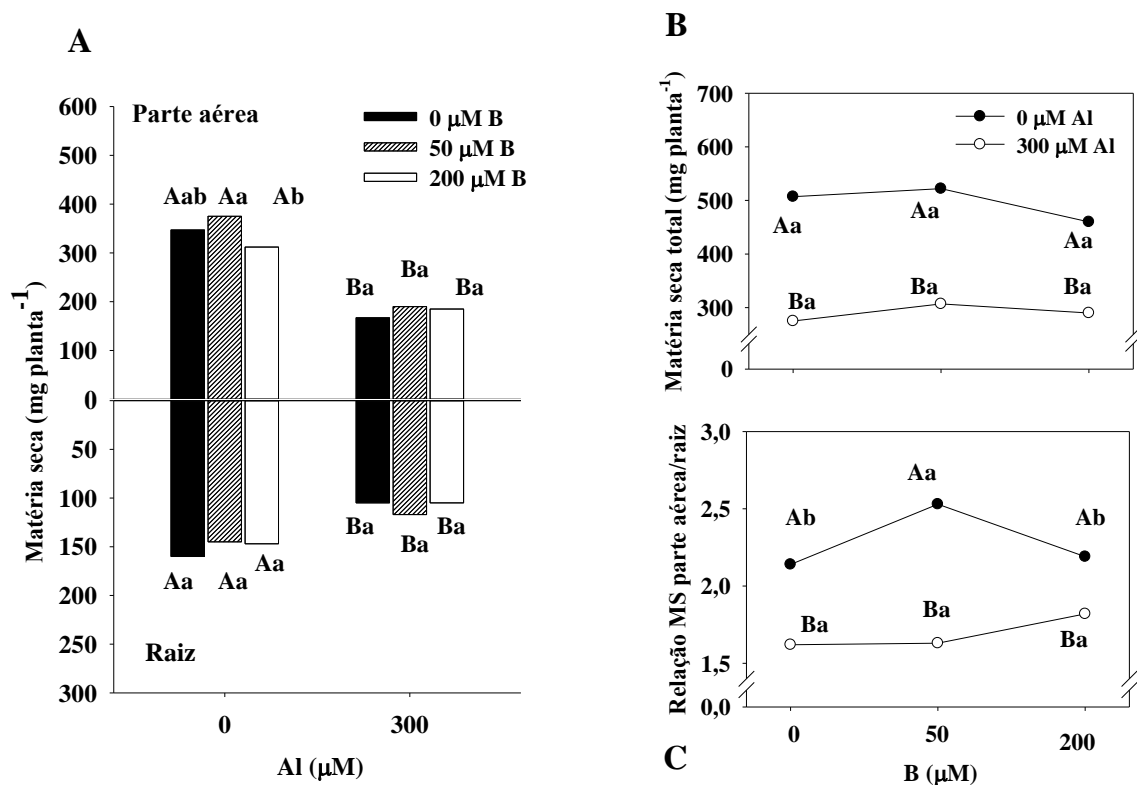


Figura 2. Produção de matéria seca em milho em resposta a variação do nível de B e Al em solução nutritiva.

A = Parte aérea e de raiz, B = matéria seca total, C = relação parte aérea/raiz.

Para cada dose de B (efeito do Al), médias seguidas pela mesma letra maiúscula, e para cada dose de Al (efeito do B), médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem por Tukey ($p < 0,05$).

Em relação à atividade transpiratória do milho, observou-se influência dos tratamentos analisados (B e Al), sendo que esta oscilou em função da presença ou ausência dos tratamentos (Figura 3). A transpiração, avaliada com a presença de B e Al em solução, foi maior nas plantas com maior alocação de matéria seca na parte aérea (0 μM Al; 50 μM B). Enquanto que este efeito não foi recorrente quando a medição transpiratória ocorreu sem a presença dos tratamentos na solução nutritiva. Todavia, o fator transcendente entre as diferentes datas de avaliação foi o efeito da toxidez por Al.

A transpiração é dependente da quantidade de matéria vegetal produzida, bem como de fatores que podem impactar sobre a abertura e fechamento de estômatos (Taiz & Zeiger, 2002). Ben-Gal & Shani (2003) observaram que carência e toxidez de B reduzem o acúmulo de matéria seca de tomateiro (*Lycopersicum esculentum* Mill.), de maneira que a

transpiração foi, por conseguinte depreciada. No mesmo sentido, Ali et al. (2011) reportam que a transpiração de cevada (*Hordeun vulgare* L.) foi reduzida pela toxidez por Al e Cr.

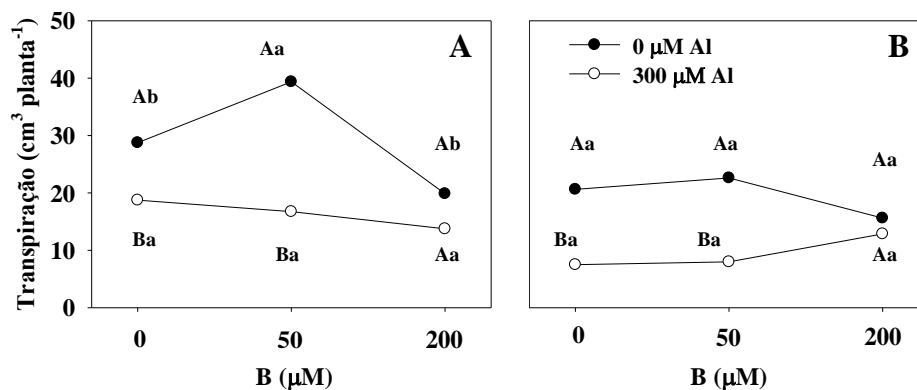


Figura 3. Transpiração em plantas de milho em resposta a variação do nível de B e Al em solução nutritiva.

A = tratamentos presentes na solução; B= tratamentos retirados da solução.

Para cada dose de B (efeito do Al), médias seguidas pela mesma letra maiúscula, e para cada dose de Al (efeito do B), médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem por Tukey ($p < 0,05$).

3.2 ATRIBUTOS RADICULARES E MÉTODOS DE ANÁLISE DE CTC DA RAIZ

O sistema radicular das plantas de milho apresentou claramente sintomas da rizotoxidez alumínica (Figura 4A). O impacto do Al foi claramente danoso sobre comprimento, área superficial e volume radicular, em atrelamento com os resultados de matéria seca (Figura 2A). Esse comportamento foi similarmente observado em plantas de trigo – *Triticum aestivum* L. (Hossain et al., 2004), sorgo – *Sorghum bicolor* L. (Perreira et al., 2008) e soja (Silva et al., 2009). Não obstante, a rizotoxidez determinou maior porcentagem de matéria seca, portanto, menor umidade radicular (Figura 4B). Neste ponto é necessário informar a situação captada ao final do cultivo hidropônico, na qual através do sentido do tato, se constatou menor maleabilidade das raízes em condição alumino-tóxica. Esse sintoma corrobora com Furlani & Clark (1981), que destacam raízes de sorgo mais quebradiças em resposta ao Al.

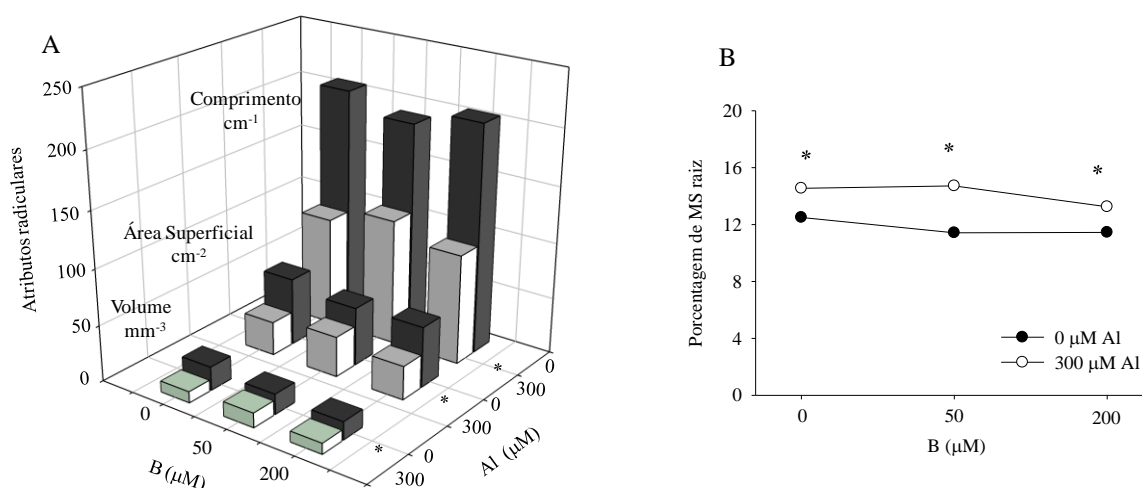


Figura 4. Atributos radiculares em plantas de milho em resposta a variação do nível de B e Al em solução nutritiva.

A = comprimento/área superficial/volume; B = porcentagem de matéria seca.

Efeito significativo do tratamento de Al ($p < 0,05$) = *.

O enriquecimento da solução nutritiva com B e Al causou redução no aparato trocador de cátions nas raízes de milho, sendo que os métodos utilizados para tal determinação demonstraram sensibilidade diferenciada (Figura 5). Neste sentido, foram acessados três comportamentos estatísticos entre a gama de quatro métodos utilizados: (I) os métodos KCl pH 7 e Extração catiônica indicaram que a adição de B (50 e 200 µM) proporcionou redução na CTC radicular na ausência de Al, por sua vez, a adição de Al apenas reduziu a capacidade sob ausência bórica; (II) o método Adsorção catiônica demonstrou que a CTC radicular foi reduzida pela adição de B, independentemente do tratamento de Al (0 e 300 µM), e, o Al teve este efeito unicamente na ausência de adição de B; (III) o método Delta pH discerniu os níveis de B independente do Al, ao passo que o efeito do Al foi discriminado para os três níveis de B. Em adição, na condição atóxica, este método separou os níveis de B em três, o que não ocorreu com nenhum dos outros métodos.

O efeito da interação B/Al, registrado na raiz do milho, corrobora com os resultados observados por Stass et al. (2007) em paredes celulares de células do ápice radicular de feijoeiro. Ainda, os autores observaram que esse comportamento foi acompanhado pelo maior crescimento radicular. Porém, com milho não se verificou alteração das variáveis analisadas no sistema radicular em relação ao B diminuir a toxidez pelo Al (Figura 2A; Figura 4), o que

pode ser devido às fabáceas apresentarem CTC radicular maior que poáceas (Asher & Ozanne, 1961), portanto, com mais sítios de ligação para o Al.

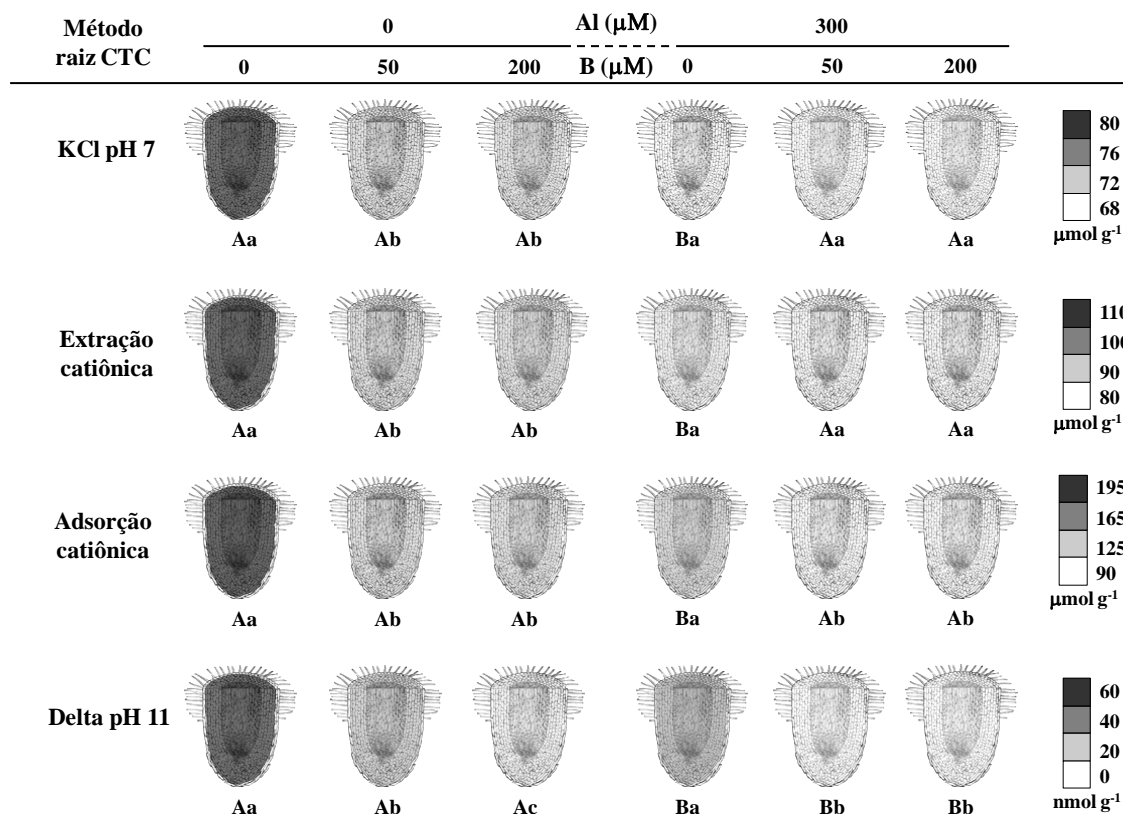


Figura 5. Capacidade de troca catiônica em raízes de milho por diferentes métodos em resposta a variação do nível de B e Al na solução nutritiva.

Para cada dose de B (efeito do Al), médias seguidas pela mesma letra maiúscula, e para cada dose de Al (efeito do B), médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem por Tukey ($p < 0,05$).

A sensibilidade diferenciada dos métodos é explicada pela variância do pré-tratamento ácido. No método do KCl pH 7 (Crooke, 1964), a solução ácida é de $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ (5 minutos agitação), ao passo que nos métodos Adsorção catiônica e Delta pH 11, a solução é de $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ (2 horas agitação), ambos com HCl. Portanto, o primeiro possivelmente não é eficaz na remoção da interferência do Al, conseqüente, o efeito do B na CTC não transparece, enquanto nos outros dois, ocorre a limpeza pela solução ácida mais forte, o que permite que o teste posterior expresse melhor os resultados.

Por outro lado, o uso do somatório de nutrientes catiônicos extraídos pela solução de HCl $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ também não foi eficiente para captar microvariações. Nesse caso, pode estar relacionado ao fato de que este método não tem pré-tratamento. Portanto, uma fração dos

nutrientes extraídos pode ser proveniente da superfície da raiz ou do espaço intercelular que pode não estar sob os domínios do campo de atração da parede celular, interferindo no resultado de CTC em nível de microvariação.

Com a extração com HCl 0,05 mol L⁻¹ foram retiradas quantidades variáveis de nutrientes do tecido radicular de milho, com magnitude atrelada aos tratamentos de B e Al (Tabela 1).

Os teores dos macronutrientes P e K apresentaram o mesmo comportamento em relação aos tratamentos avaliados, no qual o nível de 50 µM de B proporcionou maiores valores desses nutrientes somente na condição atóxica, enquanto que o Al causou depressão. Em contraste, os macronutrientes Ca e Mg na condição livre de Al, foram extraídos em maior quantidade na ausência de B. Já na alumino-toxidez, o Ca foi reduzido apenas na ausência de B, ao passo que para o Mg, a redução ocorreu na independência do nível de B.

O micronutriente Fe, na ausência de Al, variou em função do B na seguinte ordem: 200 > 50 > 0 µM. A adição de Al proporcionou, em geral, maior quantidade extraída, com efeito significativo na ausência de suplementação bórica. Por outra via, a quantidade extraída dos micronutrientes Mn, Cu e Zn não tiveram impacto dos tratamentos de B, entretanto, o Al reduziu a extração para todas as condições de B.

Em perspectiva geral, tem-se que Mn, Cu e Zn não tiveram variação ajustada com valores obtidos de CTC radicular, independente do método empregado para análise (Figura 5). Para o P e K na ausência de Al, observou-se que as menores quantidades extraídas ocorreram na ausência de adição de B, portanto, na condição de raízes com maior CTC. Entretanto, concatenar esse comportamento apenas a CTC é claudicante, tendo em vista que não se repetiu na presença de Al, além disso, naquela condição ocorreu sutilmente (efeito somente numérico) maior matéria seca de raízes (Figura 2A). Não obstante, P e K extraídos devem estar relacionados interativamente a diferentes fatores.

Diferentemente, Ca, Mg e Fe tiveram quantidades extraídas variando de forma semelhante a CTC radicular (Figura 5), exceto para a variação do B na condição tóxica, com os métodos Adsorção catiônica e Delta pH 11. Todavia, no caso do Fe, a similaridade com valores de CTC radicular ocorreu de forma inversa, o que indica que quanto mais protuberante o aparato de troca catiônica, maior a força de ligação deste micronutriente.

Estritamente em relação à CTC radicular determinada pelo método Extração catiônica (somatório de cátions, exceto K), Ca e Mg foram aqueles que mais contribuíram para os

resultados obtidos (Figura 5; Tabela 1). Isso resulta da aparente ausência de efeito da CTC sobre os micronutrientes e, ao comportamento peculiar do Fe. Wu & Hendershot (2009) avaliando a CTC radicular de ervilha verificaram extração catiônica na seguinte ordem decrescente: Ca – Zn – Cu – Mn – Ni.

Tabela 1. Nutrientes extraídos pela solução de HCl 0,05 mol L⁻¹ da matéria seca de raízes de plantas de milho em resposta a variação do nível de B e Al na solução nutritiva

Nutriente extraído	0			Al μ M			300		
	0	50	200	B μ M	0	50	200		
	----- g kg ⁻¹ -----								
P	0,86 ^{Ab}	1,32 ^{Aa}	1,12 ^{Aab}		0,45 ^{Ba}	0,63 ^{Ba}	0,40 ^{Ba}		
K	17,8 ^{Ab}	21,5 ^{Aa}	19,0 ^{Aab}		8,81 ^{Ba}	8,65 ^{Ba}	8,02 ^{Ba}		
Ca	2,32 ^{Aa}	1,62 ^{Ab}	1,81 ^{Ab}		1,86 ^{Ba}	1,72 ^{Aa}	1,77 ^{Aa}		
Mg	0,97 ^{Aa}	0,82 ^{Aab}	0,77 ^{Ab}		0,68 ^{Ba}	0,60 ^{Ba}	0,62 ^{Ba}		
Fe	0,23 ^{Bb}	0,26 ^{Bab}	0,31 ^{Aa}		0,33 ^{Aa}	0,34 ^{Aa}	0,35 ^{Aa}		
Mn	0,23 ^{Aa}	0,27 ^{Aa}	0,23 ^{Aa}		0,15 ^{Ba}	0,16 ^{Ba}	0,17 ^{Ba}		
Cu	0,13 ^{Aa}	0,16 ^{Aa}	0,15 ^{Aa}		0,11 ^{Ba}	0,10 ^{Ba}	0,11 ^{Ba}		
Zn	0,15 ^{Aa}	0,16 ^{Aa}	0,16 ^{Aa}		0,12 ^{Ba}	0,13 ^{Ba}	0,11 ^{Ba}		

Para cada dose de B (efeito do Al), médias seguidas pela mesma letra maiúscula, e para cada dose de Al (efeito do B), médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem por Tukey (p < 0,05).

A capacidade de adsorção catiônica do tecido radicular de milho foi variante quando considerados os tratamentos de B e Al na solução de nutrientes (Tabela 2). A quantidade individual de cátions adsorvidos varia em função dos tratamentos, o que sugere que a preferência de adsorção varia entre CTC radicular com valores altos e baixos. Assim, tomando-se o tratamento sem adição de B e Al (maior CTC) a ordem de adsorção foi a seguinte: Fe > Ca > Mg > Cu > Mn > Zn. Por outro lado, no tratamento com adição de 200 μ M B e 300 μ M Al (menor CTC) a sequência de adsorção foi: Ca = Mg > Fe > Cu > Zn > Mn.

Analisando a capacidade de adsorção de cátions de paredes celulares de raízes de azevém (*Lolium multiflorum* L.; baixa CTC) e trevo vermelho (*Trifolium pratense* L.; alta CTC), Amory & Dufey (1984) reportam que, independentemente da espécie vegetal a adsorção de Ca foi maior que aquela verificada para Mg, sendo que este foi similar ao K. Da mesma forma, Keltjens (1995) constatou que Ca foi adsorvido em maiores quantidades que o

Mg em raízes de milho. Entretanto, somente na condição de menor CTC (200 μM B e 300 μM Al) as raízes de milho equilibraram a adsorção de Ca e Mg, sendo que nas demais, os resultados corroboram com Amory & Dufey (1984) e Keltjens (1995). Entre os micronutrientes, independentemente do tratamento (CTC alta e baixa), o Fe foi aquele que apresentou maior potencial de adsorção. Em adição, o Cu apesar de apresentar menores valores, discriminou bem os tratamentos de B e Al. Portanto, em função da afinidade, é verossímil que estes micronutrientes isoladamente sejam bons indicadores para estudos de CTC radicular.

Tabela 2. Nutrientes catiônicos adsorvidos pela matéria seca de raízes de plantas de milho em resposta a variação do nível de B e Al na solução nutritiva

Nutriente adsorvido ¹	0			Al μM			300		
	0	50	200	B μM	0	50	200		
	----- g kg ⁻¹ -----								
Ca	1,91 ^{Aa}	1,05 ^{Ab}	1,07 ^{Ab}		1,01 ^{Ba}	1,05 ^{Aa}	1,04 ^{Aa}		
Mg	1,29 ^{Aa}	0,71 ^{Ab}	0,98 ^{Aab}		0,74 ^{Ba}	0,84 ^{Aa}	1,04 ^{Aa}		
Fe	2,78 ^{Aa}	2,05 ^{Ab}	0,58 ^{Ac}		2,30 ^{Ba}	1,12 ^{Bb}	0,63 ^{Ab}		
Mn	0,79 ^{Aa}	0,68 ^{Aa}	0,31 ^{Ab}		0,67 ^{Aa}	0,52 ^{Aa}	0,18 ^{Ab}		
Cu	1,18 ^{Aa}	0,81 ^{Ab}	0,40 ^{Ac}		0,93 ^{Ba}	0,57 ^{Ab}	0,31 ^{Ab}		
Zn	0,47 ^{Aa}	0,45 ^{Aa}	0,27 ^{Ab}		0,40 ^{Aa}	0,31 ^{Aa}	0,27 ^{Aa}		

¹ Solução de adsorção em mg L⁻¹: Ca – 1,0; Mg – 1,0; Fe – 0,2; Mn – 0,2; Cu – 0,2; Zn – 0,2. Para cada dose de B (efeito do Al), médias seguidas pela mesma letra maiúscula, e para cada dose de Al (efeito do B), médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem por Tukey (p < 0,05).

Considerando os resultados obtidos, se destaca o método de análise de CTC radicular Delta pH 11, que discriminou claramente o efeito tanto do B como do Al. Adicionalmente, este método foi aquele de maior praticidade, de maneira que um maior número de amostras poderiam ser analisadas em um curto período e com baixo custo. Porém, esse método apresentou grande variação entre os tratamentos, chegando a valores próximos de zero nas raízes com menor CTC, o que poderá em alguma condição complicar a análise estatística. Dessa maneira, esse método deve ser mais bem avaliado. Assim, tendo a disponibilidade de mais tempo e equipamento de absorção atômica (ou similar), o método de Adsorção catiônica torna-se interessante.

3.3 DEPLEÇÃO DE NUTRIENTES DA SOLUÇÃO NUTRITIVA

No teste de depleção de nutrientes em que os tratamentos de B e Al foram mantidos na solução nutritiva, somente N-NH₄⁺, K e Zn apresentaram variação significativa (Tabela 3). Para estes nutrientes houve efeito depressivo com a adição de Al, sendo que o fator de variação B não alterou com significância a depleção. Para a depleção de K, os dados se concatenam com o reportado por Mendonça et al. (2003), porém, os autores também verificaram efeito negativo para Ca, Mg e P.

Os resultados indicam que a toxidez por Al provoca alterações nas raízes e no metabolismo da planta que diminuiriam a capacidade da planta absorver N-NH₄⁺, K e Zn.

Ressaltasse que a técnica de depleção de nutrientes vem sendo utilizada em pesquisas para avaliação do efeito do Al, entre outras, como a avaliação da eficiência de absorção de P em diferentes cultivares (Pereira et al., 2008). Desse modo, o teste sofre influência da condição atual da planta, que depende das condições que esta vinha experimentando no período anterior ao teste, bem como a condição durante o período em que o teste é realizado.

Tabela 3. Depleção de nutrientes por plantas de milho cultivadas em resposta a variação do nível de B e Al na solução nutritiva (tratamentos mantidos durante o teste)

Nutriente	0			Al μM	300		
	0	50	200	B μM	0	50	200
	----- $\mu\text{mol g}^{-1}$ matéria fresca raiz -----						
N-NH ₄	18,4 ^{Aa}	18,8 ^{Aa}	18,4 ^{Aa}		17,3 ^{Ba}	17,2 ^{Ba}	17,4 ^{Ba}
P	5,03	4,83	4,28		5,78	4,24	4,45
K	49,1 ^{Aa}	53,7 ^{Aa}	51,4 ^{Aa}		39,5 ^{Ba}	39,8 ^{Ba}	42,6 ^{Ba}
Ca	15,8	17,2	16,0		15,1	17,4	16,1
Mg	11,3	13,4	13,0		12,0	12,2	12,6
Fe	7,35	7,38	7,28		7,02	7,16	6,92
Mn	7,60	7,25	7,10		6,65	7,57	7,13
Cu	2,02	2,02	1,86		1,93	1,61	1,11
Zn	1,70 ^{Aa}	1,73 ^{Aa}	1,66 ^{Aa}		1,28 ^{Ba}	1,47 ^{Ba}	1,36 ^{Ba}

Para cada dose de B (efeito do Al), médias seguidas pela mesma letra maiúscula, e para cada dose de Al (efeito do B), médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem por Tukey ($p < 0,05$).

Já no teste de depleção de nutrientes em que os tratamentos de B e Al foram retirados da solução nutritiva, N-NH₄⁺, P e Cu apresentaram variação (Tabela 4). A condição alumino-

tóxica propiciou menor depleção de N-NH_4^+ nos níveis 0 e 50 μM de B, enquanto que o nível de 200 μM B preveniu esse efeito.

Ao contrário do que se alcançou com a manutenção dos tratamentos em solução, na ausência destes, a depleção de P foi alterada. Na ausência do fator Al, o B teve efeito na seguinte ordem: $50 > 200 > 0 \mu\text{M}$. Em paralelo, as plantas crescidas sob toxidez alumínica apresentaram menor depleção fosfatada, não sendo distinguível efeito do B.

A depleção de Cu variou com significância somente com a adição de B na condição livre de toxidez por Al, atingindo maiores valores com o tratamento 50 μM . Contudo, apesar de significativas as variações foram pequenas em termos numéricos.

No global, em nenhum dos testes de depleção houve efeito do B em amenizar a toxidez por Al. Porém, na ausência de Al, a aplicação de 50 μM de B apresentou efeito na depleção de nutrientes, nível que coincide com a maior produção de matéria seca da parte aérea.

Tabela 4. Depleção de nutrientes por milho cultivado em resposta a variação do nível de B e Al na solução nutritiva (tratamentos retirados durante o teste)

Nutriente	0			Al μM			300		
	0	50	200	B μM	0	50	200		
	----- $\mu\text{mol g}^{-1}$ matéria fresca raiz -----								
N- NH_4	17,8 ^{Aa}	18,1 ^{Aa}	18,2 ^{Aa}		16,3 ^{Ba}	16,7 ^{Ba}	17,5 ^{Aa}		
P	5,44 ^{Ab}	6,54 ^{Aa}	6,15 ^{Aab}		4,15 ^{Ba}	4,86 ^{Ba}	4,45 ^{Ba}		
K	40,2	53,6	49,1		49,3	48,9	51,6		
Ca	13,9	13,0	13,5		12,8	13,5	13,0		
Mg	12,6	13,3	11,8		12,9	14,0	12,2		
Fe	7,73	7,30	7,44		6,25	6,04	6,50		
Mn	6,20	6,79	5,90		5,90	6,29	5,62		
Cu	2,66 ^{Ab}	2,95 ^{Aa}	2,51 ^{Ab}		2,64 ^{Aa}	2,70 ^{Aa}	2,59 ^{Aa}		
Zn	1,77	1,77	1,54		1,67	1,58	1,58		

Para cada dose de B (efeito do Al), médias seguidas pela mesma letra maiúscula, e para cada dose de Al (efeito do B), médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem por Tukey ($p < 0,05$).

Conforme Fageria & Moreira (2011) plantas com alta CTC radicular absorvem mais Ca e Mg, enquanto aquelas com CTC baixa, absorvem mais K. Assim, quando poáceas e fabáceas são cultivadas juntas, em sistemas mistos, as últimas podem sofrer com deficiência

potássica. Entretanto, no presente trabalho a variação de CTC não demonstrou esse efeito para o milho, de maneira que se tem como quimeria a reduzida amplitude, já que cultivando espécies das diferentes famílias a amplitude é maior (Asher & Ozanne, 1961).

No teste de depleção em que os tratamentos de B e Al foram mantidos na solução nutritiva, a depleção de nutrientes se correlacionou com diferentes variáveis mensuradas nas plantas de milho (Tabela 5). Entre as variáveis, a transpiração por planta foi aquela que apresentou o maior número de correlações significativas, não se ajustando somente com o macronutriente Mg. Tal fato indica que a transpiração pode ser resultante da atividade biológica da planta no período de 24 horas em que se conduziu o teste de depleção, mas que também é reflexo da matéria seca das plantas, que teve acúmulo anterior ao teste. Por outro lado, entre os nutrientes avaliados, a depleção de Zn foi mais correlacionada com variáveis de planta, somente não apresentando correlação com a CTC radicular.

Tabela 5. Correlação de Pearson entre a depleção de nutrientes (B e Al presentes na solução nutritiva) e atributos de plantas de milho em resposta a variação do nível de B e Al na solução nutritiva

	N- NH ₄ ⁺	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu
T planta	0,75**	0,44*	0,69**	0,46**	0,33	0,46**	0,53*	0,70**	0,51**
MS PA	0,25	0,12	0,21	-0,11	0,06	0,02	0,01	0,43*	-0,01
MS raiz	0,25	0,11	0,20	-0,11	0,06	0,02	0,11	0,42*	-0,01
% MS raiz	-0,39*	-0,13	-0,22	-0,01	0,15	-0,20	-0,16	-0,41*	-0,15
L raiz	0,40*	0,19	0,38	0,02	0,01	0,15	0,19	0,55**	0,22
AS raiz	0,37	0,19	0,31	-0,03	-0,06	0,16	0,14	0,58**	0,24
V raiz	0,31	0,18	0,21	-0,01	-0,13	0,17	0,11	0,56**	0,28
CTC raiz ¹	0,35	0,29	0,31	-0,11	-0,22	0,04	-0,14	0,15	0,21
CTC raiz ²	0,40*	0,15	0,35	-0,11	-0,22	0,09	-0,11	0,35	0,31
CTC raiz ³	0,23	-0,05	0,17	-0,17	-0,28	0,05	-0,11	0,26	0,28
CTC raiz ⁴	0,25	-0,12	0,15	0,02	-0,12	0,08	-0,02	0,17	0,40*

¹ método KCl pH 7; ² Extração catiônica; ³ Adsorção catiônica; ⁴ Delta pH 11;

* = p < 0,05; ** = p < 0,01.

Os métodos de determinação da CTC radicular Extração catiônica e Delta pH 11 apresentaram correlação de Pearson significativa, sendo, respectivamente com N-NH₄⁺ (r =

0,40) e Cu ($r = 0,40$) (Tabela 5). Sendo que o primeiro foi afetado significativamente pelo tratamento de Al, e numericamente para o segundo (Tabela 3), nesta ordem, pode-se dizer que as correlações (apesar de ínfimas) ocorreram mais em função desse tratamento.

No teste de depleção em que os tratamentos de B e Al foram mantidos na solução nutritiva, observou-se que os macronutrientes $N-NH_4^+$, P e K foram altamente correlacionados (Tabela 6). Enquanto que Ca não teve depleção correlacionada com outro macronutriente, ao passo que Mg teve correlação com P e K. Já os micronutrientes Fe, Mn, Zn e Cu tiveram depleção correlacionada entre si, com valores de coeficiente de correlação de Pearson variando entre 0,40 e 0,71. Em paralelo, os nutrientes macro e micro apresentaram correlações, sendo que o P teve sua depleção acompanhada por todos os micronutrientes avaliados.

Tabela 6. Correlação de Pearson entre nutrientes avaliados no teste de depleção (B e Al presentes na solução nutritiva) por plantas de milho em resposta a variação do nível de B e Al na solução nutritiva

	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu
$N-NH_4^+$	0,61**	0,90**	0,32	0,31	0,56**	0,58**	0,65**	0,37
P		0,67**	0,28	0,43*	0,53**	0,65**	0,53**	0,42*
K			0,36	0,50**	0,39	0,57**	0,57**	0,32
Ca				0,23	0,36	0,53**	0,36	0,47*
Mg					- 0,12	0,47*	0,23	0,03
Fe						0,62**	0,57**	0,40*
Mn							0,71**	0,52**
Zn								0,53**

* = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$.

No teste de depleção onde B e Al foram retirados da solução nutritiva a transpiração se manteve como a variável vegetal mais correlacionada com a depleção de nutrientes (Tabela 7), similarmente ao teste em que foram mantidos os tratamentos (Tabela 5). Contudo, em termos de nutriente, não se repetiu para o Zn o alto número de correlações, sendo que neste teste o foi para $N-NH_4^+$, com valores de coeficiente de correlação entre -0,39 e 0,71. Todavia, apesar de o P apresentar menos correlações, houve correlação da depleção desse nutriente com transpiração, % matéria seca, comprimento, área superficial e volume radicular. Quanto à

CTC radicular, os valores obtidos pelo método da Adsorção catiônica se correlacionaram apenas com a depleção de Zn, enquanto que aqueles alcançados pelo Delta pH 11 tiveram correlação com Zn e Cu.

Na ausência dos tratamentos na solução nutritiva, a depleção de N-NH_4^+ teve correlação apenas com P, ao passo que este houve com K e Mg, para além disso não ocorreu correlação significativa entre os macronutrientes (Tabela 8). Considerando somente os micronutrientes, Mn, Zn e Cu apresentaram depleção correlacionada entre si, ao passo que isso não ocorreu com o Fe. Macro e micronutrientes apresentaram correlações entre si, sendo estas entre N-NH_4^+ com Fe; P com Mn e Cu; K com Mn, Zn e Cu; Mg com Mn e Cu. Não obstante, o Ca foi o único macronutriente que não teve depleção atrelada a nenhum micronutriente.

Tabela 7. Correlação de Pearson entre a depleção de nutrientes (B e Al retirados da solução nutritiva) e atributos de plantas de milho em resposta a variação do nível de B e Al na solução nutritiva

	N- NH_4^+	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu
T planta	0,71**	0,70**	0,50**	0,36	-0,03	0,33	0,41*	0,50**	0,44*
MS pa	0,60**	0,31	-0,21	0,22	-0,17	0,19	0,04	0,09	-0,01
MS raiz	0,50**	0,34	-0,09	0,17	-0,09	0,07	0,11	0,25	0,03
% MS raiz	-0,39*	-0,40*	-0,16	0,10	0,24	-0,47*	0,04	0,09	0,11
L raiz	0,52**	0,48**	0,09	0,16	0,04	0,08	0,19	0,17	0,06
AS raiz	0,56**	0,48**	-0,01	0,13	-0,03	0,16	0,14	0,17	0,04
V raiz	0,54**	0,48**	-0,11	0,07	-0,09	0,21	0,07	0,13	0,07
CTC raiz ¹	0,12	0,09	-0,17	-0,07	-0,29	-0,01	0,06	0,21	-0,17
CTC raiz ²	0,30	0,29	-0,13	-0,17	-0,31	0,18	0,01	0,21	-0,12
CTC raiz ³	0,21	0,24	-0,02	-0,27	-0,06	-0,01	0,18	0,50**	0,13
CTC raiz ⁴	0,32	0,36	0,08	-0,30	0,12	0,12	0,24	0,40*	0,44*

¹ método KCl pH 7; ² Extração catiônica; ³ Adsorção catiônica; ⁴ Delta pH 11;

* = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$.

Tabela 8. Correlação de Pearson entre nutrientes avaliados no teste de depleção (B e Al retirados da solução nutritiva) por plantas de milho em resposta a variação do nível de B e Al na solução nutritiva

	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu
N-NH ₄ ⁺	0,70**	0,34	0,21	0,01	0,50**	0,18	0,11	0,32
P		0,51**	0,17	0,43*	0,32	0,49**	0,29	0,63**
K			0,14	0,33	0,08	0,50**	0,40*	0,52**
Ca				- 0,06	0,01	0,01	- 0,01	0,07
Mg					- 0,26	0,50**	0,20	0,52**
Fe						0,15	- 0,04	0,10
Mn							0,67**	0,70**
Zn								0,58**

* = p < 0,05; ** = p < 0,01.

3.4 VARIÁVEIS DE ANÁLISE FOLIAR

A análise foliar de milho por imagens digitais distinguiu alguns aspectos dos tratamentos adicionados a solução nutritiva (Figura 6). O matiz da cor verde teve sincronia com as variáveis de claro/escuro (Brilho) e de intensidade da cor verde escuro (ICVE) no que tange a predição do efeito de toxidez imposto pelo Al. Contudo, apesar de as folhas das plantas intoxicadas ficarem menos verdes e mais brilhantes, o grau de saturação da cor espectral se manteve. Esses resultados indicam que a toxidez por Al provocou redução das clorofilas na folha, de modo que as folhas ficaram mais claras.

Optou-se pela utilização do matiz da cor verde em detrimento ao componente G - *green* (RGB), por que o primeiro considera os demais componentes (R - *red* e B - *blue*), assim, incrementa o leque de tonalidades, que corrobora para dados mais precisos acerca da cor verde da imagem. Nesse sentido, o uso exclusivamente do componente G, por vezes (Karcher & Richardson, 2003) pode não distinguir plantas tratadas com diferentes doses de fertilizante nitrogenado (macrovariação). Todavia, apesar de algumas variáveis da análise foliar digital terem sido eficientes para captar variação abrupta (tratamento com Al), nenhuma o foi para variação em menor escala (tratamento com B).

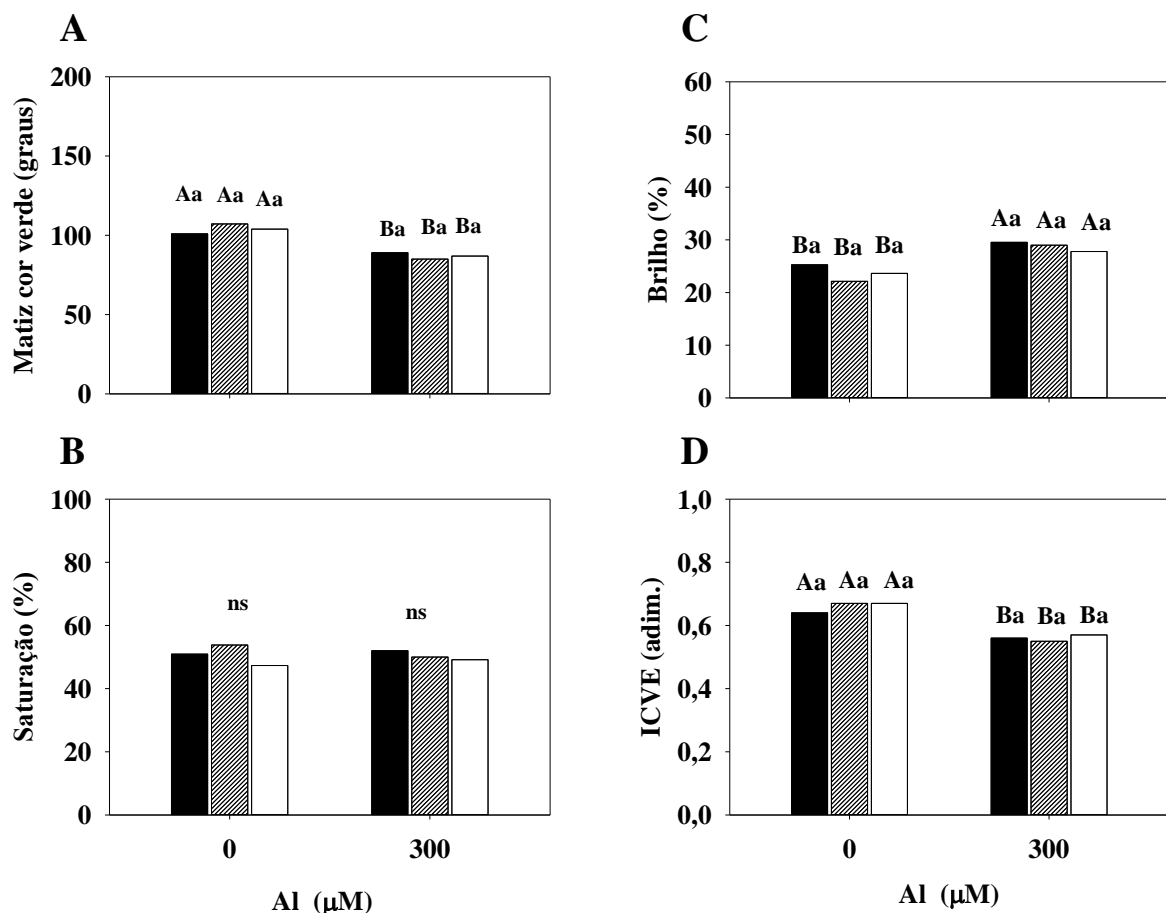


Figura 6. Análise foliar em milho por imagem digital em resposta a variação do nível de B e Al na solução nutritiva.

A = matiz da cor verde; B = saturação; C = brilho; D = índice de cor verde escura (ICVE).

Para cada dose de B (efeito do Al), médias seguidas pela mesma letra maiúscula, e para cada dose de Al (efeito do B), médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem por Tukey ($p < 0,05$).

A análise espectral da folha com o equipamento N tester e com a cartilha de Münsell detectou variações associadas a toxidez provocada pelo Al nas plantas de milho (Figura 7), sendo que a toxidez afetou os valores de croma na análise pela cartilha. Não obstante a relativa praticidade, a análise por estas vias não permitiu a diferenciação de tratamentos em condição microvariante (tratamento com B), similarmente aos dados das variáveis por análise foliar digital.

O equipamento N tester é um tipo de medidor de intensidade de verde foliar. Equipamentos como este têm suas leituras baseadas na absorbância de luz pelo tecido foliar (Argenta et al., 2001). Em nível de pesquisa, equipamentos assim têm sido utilizados com diferentes objetivos (Teixeira et al., 2004; Lenhard et al., 2010). Todavia, encontram no manejo da adubação nitrogenada a campo sua principal vanguarda, uma vez que o teor de

clorofilas é associado ao teor de N, que regula a produção vegetal (Argenta et al., 2001; Ortuzar-Iragorri et al., 2005; Castillo & Ligarreto, 2010). Assim, sistemas onde a necessidade de adubação é maior, como em milho de alta produtividade ou em pomares, os medidores portáteis ganham espaço (Netto et al., 2002; Hurtado et al., 2011). Entretanto, o equipamento N tester também se mostrou eficiente para captar a toxidez imposto pelo tratamento com Al nas plantas de milho no presente trabalho. Já a cartilha de Münssell para tecidos vegetais é geralmente utilizada como padrão de referência, sendo útil, por exemplo, para comparação com outros métodos de análise foliar (Karcher & Richardson, 2003), também se mostrou eficiente para discernir a Al-toxicidade.

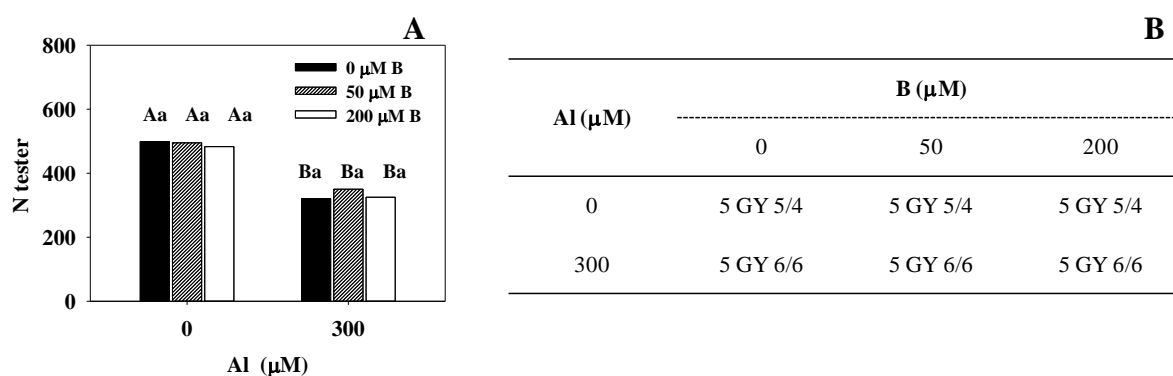


Figura 7. Análise foliar espectral em milho em resposta a variação do nível de B e Al na solução nutritiva.

A = equipamento N tester, B = cartilha de Münssell para tecidos vegetais.

Para cada dose de B (efeito do Al), médias seguidas pela mesma letra maiúscula, e para cada dose de Al (efeito do B), médias seguidas pela mesma letra minúscula não por Tukey ($p < 0,05$).

A análise foliar por extração de pigmentos foi mais sensível que as análises supracitadas, já que mostrou aspectos que não haviam sido vislumbrados, relacionados aos tratamentos de B, além do Al (Figura 8).

A clorofila *a* (Figura 8A), a qual reduziu com a aplicação de Al, teve amplitude de teores na ordem de 0,64-1,25 mg g⁻¹ matéria fresca (MF). Enquanto a clorofila *b* (Figura 8B) (amplitude 0,2-0,45 mg g⁻¹ MF), teve teores elevados pela adição de B (0 e 300 μM Al), ao passo que o Al teve impacto lesivo. Estes resultados foram parcialmente corroborantes com aqueles encontrados por Jiang et al. (2009), que encontraram, em plantas de pomelo, toxicidade sobre as clorofilas *a* e *b* com a adição de Al (142 μM), e, promoção quando diferentes níveis de B (2,5; 10; 25 e 50 μM) foram aplicados, independente do Al.

Oposicionalmente, na interação de ambos, as clorofilas foram linearmente maiores até a 25 μM B, com sequente redução pelo nível de 50 μM B.

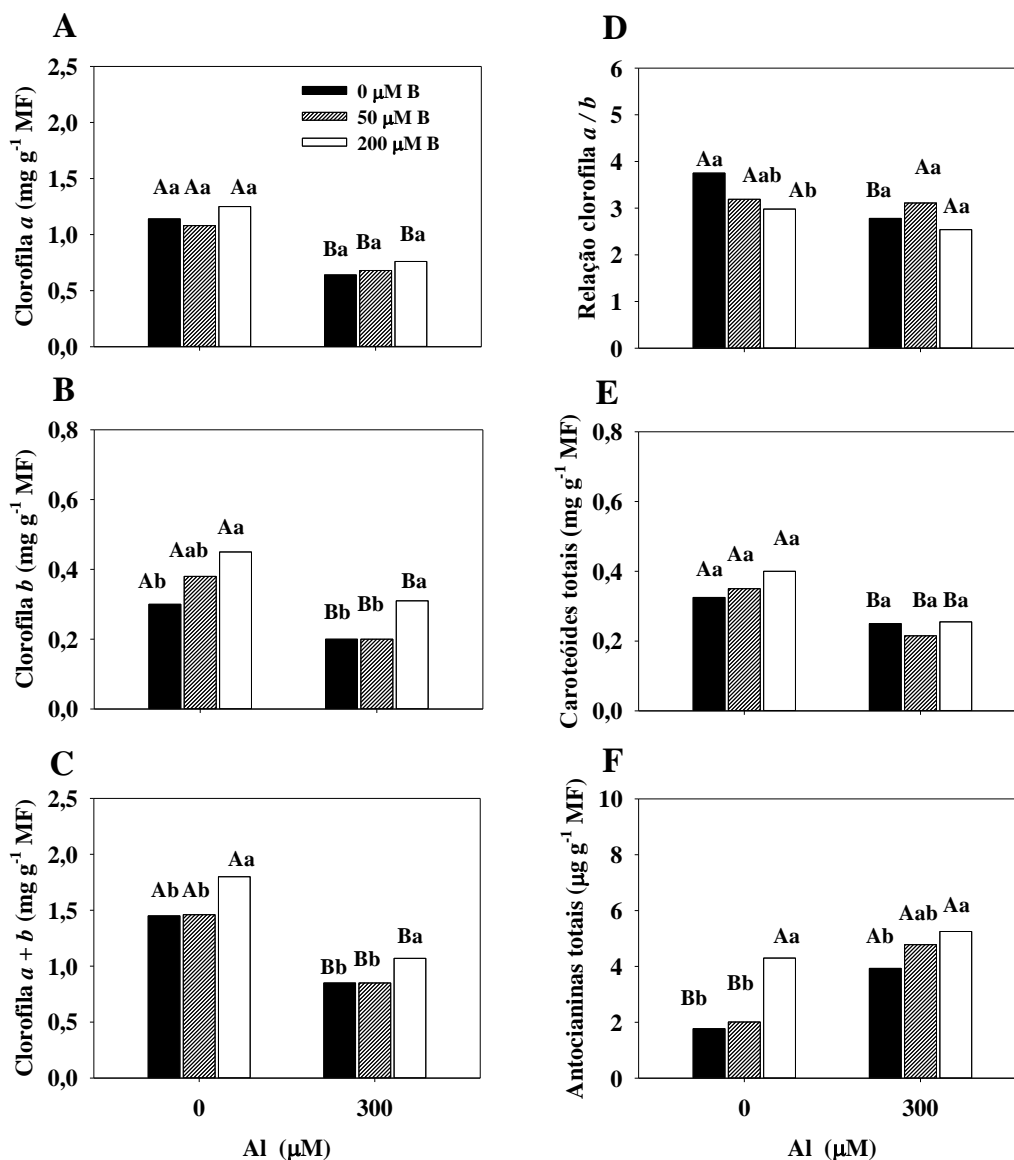


Figura 8. Análise foliar em milho por extração de pigmentos em resposta a variação do nível de B e Al na solução nutritiva.

A = clorofila *a*; B = clorofila *b*; C = clorofila *a* + *b*; D = razão clorofila *a*/*b*; E = carotenóides totais; F = antocianinas totais. Para cada dose de B (efeito do Al), médias seguidas pela mesma letra maiúscula, e para cada dose de Al (efeito do B), médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem por Tukey ($p < 0,05$).

Em consonância, o somatório de clorofilas (Figura 8C) foi positivado pelo B e negativado pelo Al, convergindo com o trabalho de Yu et al. (2009) e Jiang et al. (2009). Por

outro lado, a razão clorofila *a/b* foi alta quando não se adicionou B, sendo que apenas nesta condição houve efeito do Al (Figura 8D).

A clorofila *a* está presente em todos os organismos que realizam fotossíntese oxigênica e é considerada como o pigmento principal. A clorofila *b* é encontrada em plantas, algas verdes e algumas bactérias. Na primeira, a molécula (estrutura básica CHO) contém um grupo metil (-CH₃) associado ao anel de porfirina (neste caso, 1 átomo de Mg centralizado por 4 átomos de N), enquanto a segunda contém um grupo aldeído (-CHO). Portanto, com composição limitada pela aquisição e uso de C, H, O, N e Mg. Em adição, remetem a coloração verde (Taiz & Zeiger, 2002).

A toxidez provocada pela adição de Al proporcionou menores teores foliares de carotenoides totais (Figura 8E), sendo similar aos resultados obtidos por Silva et al. (2012) com cultivar sensível de centeio (*Secale cereale* L.). Diferentes carotenoides são conhecidos, sendo que podem ter estrutura pura em átomos de C e H (betacaroteno) ou contendo também átomos de O (zeaxantina), tendo composição livre de macro e micronutrientes. No global, remetem as cores vermelho, amarelo e alaranjado. Os carotenoides contribuem para o processo fotossintético por aumentar o espectro de absorção de luz e, principalmente, por proteger as clorofilas de danos provocados pelo excesso de energia radiante (Taiz & Zeiger, 2002).

Por fim, o enriquecimento da solução nutritiva com 200 µM de B propiciou maior teor de antocianinas totais na folha, sendo tão impactante, que o Al não desencadeou acúmulo significativo dos pigmentos somente neste nível do micronutriente (Figura 8F).

Transcorridas 24 h de reação da solução metanol/HCl/água com o tecido foliar de milho a coloração dos extratos chamou a atenção, de tal maneira que foram registradas imagens (Figura 9). As antocianinas são consideradas como moléculas do metabolismo secundário, sendo compostas basicamente por átomos de C, H e O. Tais pigmentos remetem as cores azul, vermelho, rosa e púrpura (Taiz & Zeiger, 2002).

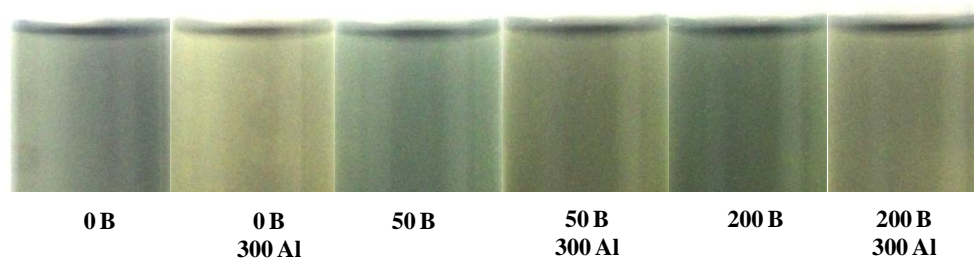


Figura 9. Solução de extração de antocianinas após 24 h de reação com o tecido foliar de milho cultivado em solução nutritiva com diferentes níveis (μM) de B e Al.

A análise de C e N nas folhas de milho indicou efeito de ambos os tratamentos estudados (B e Al) (Figura 10), em verossimilhança com o refinamento de resultados obtidos através da análise de pigmentos foliares. A não adição de B proporcionou reduzido teor de C na folha, sendo que quando de sua adição houve incremento apenas na ausência de Al (fator limitante) (Figura 10A). Em paralelo, o teor de N foi claramente reduzido pelo Al, de modo que o B teve efeitos diversificados: sem Al – relação direta; com 300 μM Al – relação inversa (Figura 10B). Dependentemente, a relação C/N (Figura 10C) foi superior na presença de Al, tendo o B efeito oposto ao teor de N.

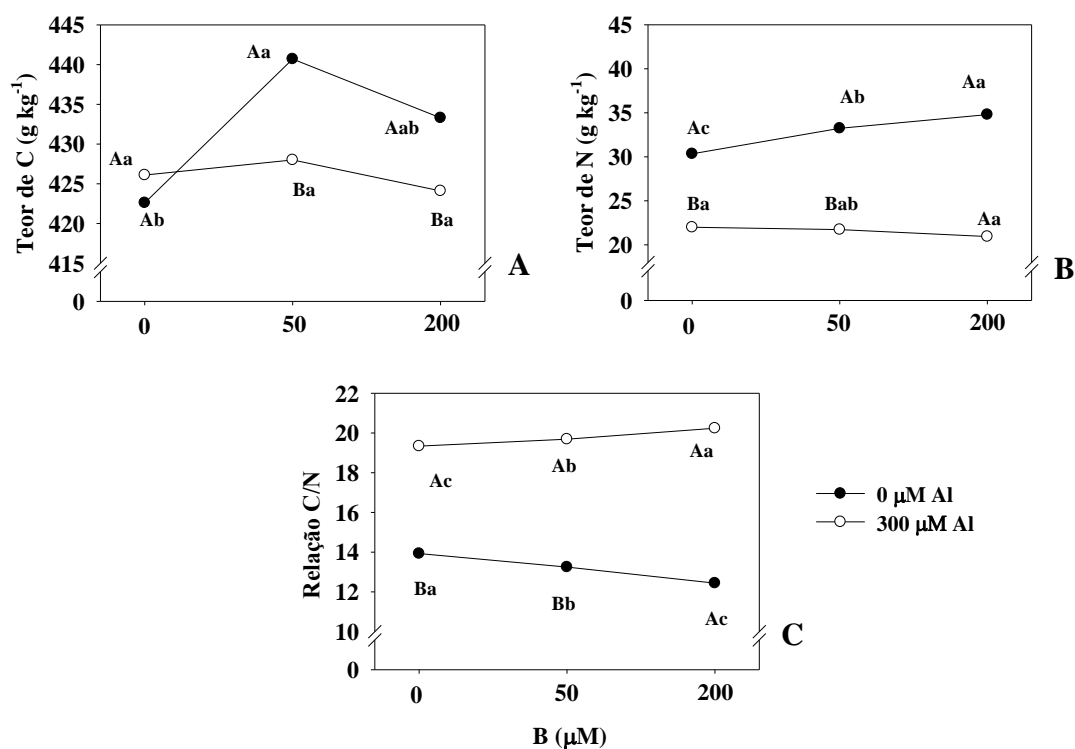


Figura 10. Análise foliar em milho por combustão via seca em resposta a variação do nível de B e Al na solução nutritiva.

A = teor de C; B = teor de N; C = relação C/N. Para cada dose de B (efeito do Al), médias seguidas pela mesma letra maiúscula, e para cada dose de Al (efeito do B), médias seguidas pela mesma letra minúsculas não diferem por Tukey ($p < 0,05$).

A via principal de aquisição dos bens naturais C e N pela planta é discrepante, tendo o primeiro a atmosfera como fonte (assimilação de CO₂), enquanto o segundo é fornecido pela solução aquosa em contato com o sistema radicular (absorção de N).

Neste espectro, destacar-se-ão três comportamentos observados por Jiang et al. (2009) com plântulas de pomelo: (1) efeito tóxico do Al (142 µM) sobre o metabolismo do C [análise de assimilação de CO₂, condutância estomática e atividade da enzima ribulose-1,5-bifosfato carboxilase/oxidase (Rubisco)]; (2) o B isoladamente proporcionou maior condutância estomática; (3) a interação B/Al revelou que a adição do micronutriente causou efeito benéfico (25 µM) e lesivo (50 µM) para o metabolismo do C. Em adição, a carência de B associada a toxidez alumínica causou acúmulo de CO₂ intercelular (devido a negatização ao metabolismo do C), ao passo que este efeito sumiu quando a solução recebeu enriquecimento bórico. Assim, para o presente experimento tem-se que os teores (totais) de C encontrados nas folhas de milho (Figura 10A), são reflexos da capacidade de aquisição deste nutriente pelas plantas, que, por fim, não indicou amenização da toxidez de Al pelo B [alto Al (300 µM) *per se* travou a aquisição de C].

Para a aquisição de N, Camacho-Cristóbal & González-Fontes (2007) reportam maior absorção de NH₄⁺ sob carência de B. Por outro lado, Purcino et al. (2003) encontraram menor capacidade de aquisição de N total quando em condição alumino-tóxica. Assim, somente o segundo trabalho corrobora com os resultados observados para as plantas de milho (Tabela 3 e 4).

Não obstante, a elevação nos teores de clorofilas (Figura 8C) pelo efeito do B acompanhou maiores teores de N (Figura 10B) na condição atóxica. De maneira que o nível de 200 µM de B, que teve menor matéria seca da parte aérea (Figura 2A), não teve prejuízo às clorofilas. Já em plantas intoxicadas, o B também esteve relacionado a maiores valores de clorofilas, porém, sem sincronia com os teores de N.

Conforme Yamamoto et al. (2002) e Jones et al. (2006), o estresse alumínico induz a formação de espécies reativas de oxigênio, portanto, a oxidação/degradação de biomoléculas é favorecida. Jiang et al. (2009) constataram que a condição alumino-tóxica induz alta fluorescência da clorofila *a*, gerando dano foto-inibitório aos sistemas fotossintéticos, contudo, a presença de B amenizou tal efeito. Sob este aspecto, as clorofilas foram preservadas, o que corrobora com os resultados obtidos para plantas de milho (Figura 8C).

Todavia, esse comportamento protecional não ocorreu para os pigmentos acessórios carotenoides totais, entretanto, coincidiu com a elevação das antocianinas (Figura 8F).

Geralmente a síntese de antocianinas é elevada pela carência de N, uma vez que estes limitam a formação de proteínas, de maneira que ocorre acúmulo de carboidratos, e, conseqüentemente, de antocianinas (Taiz & Zeiger, 2002). Assim, na condição de toxidez, como houve menor teor de N e maior relação C/N com a adição de B, a síntese de antocianinas foi promovida. Por outro lado, as plantas não submetidas à toxidez alumínica apresentaram folhas ricas em N, onde o aumento de B (200 μ M) incidiu em elevados teores de antocianinas. Dessa forma, hipotetiza-se que diferentes antocianinas estejam envolvidas, uma vez que a determinação realizada corresponde a quantidade total. Além disso, a síntese de antocianinas pode ser afetada por outros nutrientes, como P (Taiz & Zeiger, 2002).

Como destacado por Winthrop & James (1998) as antocianinas tem efeito antioxidante, sendo que podem atuar na complexação de metais (Rice-Evans et al., 1997) e proteger as clorofilas de danos por excesso de luminosidade (Gould et al., 2000). Assim, a preservação das clorofilas na condição alumino-tóxica pode estar relacionada com a promoção da síntese de antocianinas em resposta a adição de B (Figura 8). Além disso, o B pode reduzir os teores de Al na parte aérea das plantas (Yu et al., 2009; Jiang et al., 2009) ou ativar outros metabólitos antioxidantes (Tang et al., 2011), com menor impacto oxidativo, por conseguinte, na manutenção das clorofilas. Esse efeito de proteção parece verossímil para a condição atóxica, tendo em vista que no nível de 200 μ M B ocorreu menor acúmulo de matéria seca, portanto, certa toxidez boratada. Porém, clorofilas e antocianinas se mantiveram elevadas. Não obstante, provavelmente, outros mecanismos também estejam envolvidos.

O agrupamento de componentes principais das variáveis de análise foliar apresentam maior explicação dos dados pelo componente 1 (CP 1 = 59 %), separando horizontalmente as variáveis (Figura 11). Já a distribuição das amostras por tratamentos separa claramente a condição atóxica daquela com toxidez por Al. Com base nos escores dos componentes 1 (59 %) e 2 (14 %), pode-se dizer que apenas 27 % da variação não é explicada pelos dados das variáveis de análise foliar, sendo inerentes a outros atributos foliares.

A relação C/N, teor de N, matiz, N tester e ICVE ficaram mais próximos do eixo de maior explicabilidade dos dados (CP 1). Contudo, basicamente ocorreu a formação de três grupos de variáveis da análise foliar: 1 – teor de N, matiz, N tester e ICVE; 2 – clorofila *a*, *b* e total, carotenoides; 3 – relação C/N, brilho e antocianinas. As variáveis de análise matiz da

cor verde, ICVE e N tester (efeito positivo), e, brilho e antocianinas totais (efeito negativo) foram sensíveis em resposta aos teores de N-total nas folhas. Por outro lado, ocorreu relação entre os componentes do complexo de antena (clorofilas e carotenoides). Contudo, apesar do teor dos componentes do complexo antena e o teor de N terem certa correlação, apresentam agrupamento diferenciado.

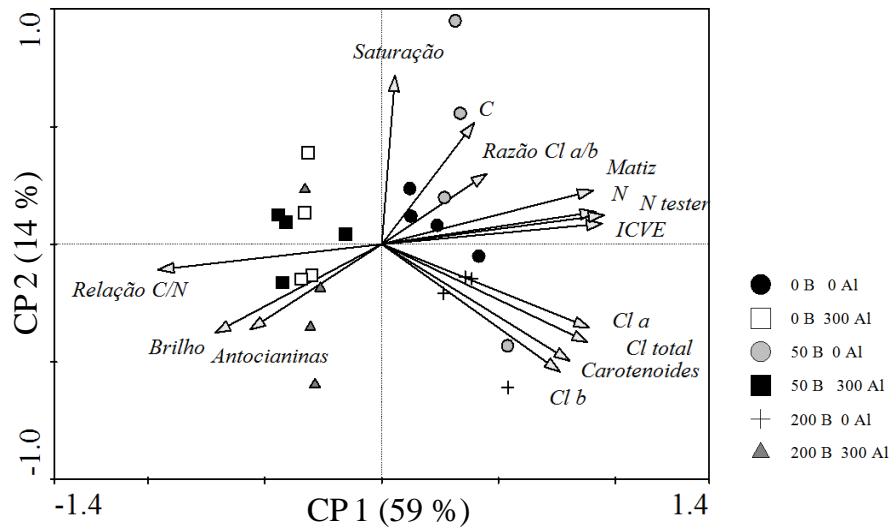


Figura 11. Agrupamento de componentes principais de análise foliar de milho cultivado em solução nutritiva com diferentes níveis (μM) de B e Al.

4 CONCLUSÃO

Tanto a adição de B como de Al diminuem a CTC radicular. Por outro lado, a toxidez alumínica reduziu os teores de clorofilas, sendo que a aplicação de B amenizou este efeito deletério. Contudo, o B isoladamente também elevou os teores daqueles pigmentos.

5 LITERATURA CITADA

AHN, S. J.; SIVAGURU, M.; OSAWA, H.; CHUNG, G. C.; MATSUMOTO, H. Aluminum inhibits the H^+ - ATAase activity by permanently altering the plasma membrane surface potentials in squash roots. *Plant Physiology*, 126:1381-1390, 2001.

ALI, S.; ZENG, F.; QIU, L.; ZHANG, G. The effect of chromium and aluminum on growth, root morphology, photosynthetic parameters and transpiration of the two barley cultivars. *Biologia Plantarum*, 55:291-296, 2011.

AMORY, D. E.; DUFEY, J. E. Adsorption and exchange of Ca, Mg and K-ions on the root cell walls of clover and rye-grass. *Plant and Soil*, 80:181-190, 1984.

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F.; BORTOLINI, C. G. Clorofila na folha como indicador do nível de nitrogênio em cereais. *Ciência Rural*, 31:715-722, 2001.

ARNON, D. I. Cooper enzymes in isolated chloroplasts: polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24:1-15, 1949.

ASHER, C.J.; OZANNE, P.G. The cation exchange capacity of plants roots, and its relationship to the uptake of insoluble nutrients. *Australian Journal Agricultural Researcher*, 12:755-766, 1961.

BELL, R. W. Diagnosis and prediction of boron deficiency for plant production. *Plant and Soil*, 193:149-168, 1997.

BEN-GAL, A.; SHANI, U. Water use and yield of tomatoes under limited water and excess boron. *Plant and Soil*, 256:179-186, 2003.

BROADLEY, M.; BROWN, P.; CAKMAK, I.; RENGEL, Z.; ZHAO, F. Functional of nutrients: micronutrients. In: MARSCHNER, P. (ed.). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. ed. 3. Elsevier, 2012, p. 191-248.

CAMACHO-CRISTÓBAL, J. J.; GONZÁLES-FONTES, A.; Boron deficiency decreases plasmalemma H⁺-ATPase expression and nitrate uptake, and promotes ammonium assimilation into asparagine in tobacco roots. *Planta*, 226:443-451, 2007.

CAMARGO, C. E. O.; KRONSTAD, W. E.; METZER, R. J. Parent-progeny regression estimates and associations of different height levels with aluminum toxicity and grain yield in wheat. *Crop Science*, 20:355-358, 1980.

CASTILLO, A. R.; LIGARRETO, G. A. Relación entre nitrógeno foliar y el contenido de clorofila, en maíz asociado con pastos en el Piedemonte Llanero colombiano. *Revista Corpoica – Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 11:122-128, 2010.

CHEN, L. S.; QI, Y. P.; JIANG, H. X.; YANG, L. T.; YANG, G. H. Photosynthesis and photoprotective systems of plants in response to aluminum toxicity. *African Journal of Biotechnology*, 9:9237-9247, 2010.

CLARK, R. B. Effect of aluminum on growth and mineral elements of Al-tolerant and Al-intolerant corn. *Plant and Soil*, 47:653-662, 1977.

COLZI, I.; ARNETOLI, M.; GALLO, A.; DOUMETT, S.; BUBBA, M.; PIGNATTELLI, S.; GABBRIELLI, R.; GONNELLI, C. Copper tolerance strategies involving the root cell wall pectins *Silene paradoxa* L. *Environmental and Experimental Botany*, 78:91-98, 2012.

CORRALES, I.; POSCHENRIEDER, C.; BARCELÓ, J. Boron-induced amelioration of aluminum toxicity in monocot and a dicot species. *Journal Plant Physiology*, 165:503-514, 2008.

CROOKE, W. M. The measurement of the cation-exchange capacity of plants roots. *Plant and Soil*, 21:43-49, 1964.

DORDAS, C. Foliar boron application improves seed set, seed yield, and seed quality of alfafa. *Agronomy Journal*, 98:907-913, 2006.

FAGERIA, N. K.; MOREIRA, A. The role of mineral nutrition on root growth of crop plants. In: SPARKS, D. L. *Advances in Agronomy* (ed.). v. 110. Burlington: Academic Press, 2011, p. 251-331.

FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. Absorção de nutrientes. In: FERNANDES, M. S. (ed.) *Nutrição mineral de plantas*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 115-152, 2006.

FREITAS, F. A.; KOPP, M. M.; SOUSA, R. O.; ZIMMER, P. D.; CARVALHO, F. I. F.; OLIVEIRA, A. C. Absorção de P, Mg, Ca e K e tolerância de genótipos de arroz submetidos a estresse por alumínio em sistemas hidropônicos. *Ciência Rural*, 36:72-79, 2006.

FRITZ, E. Measurement of cation exchange capacity (CEC) of plant cell walls by X-ray microanalysis (EDX) in the transmission electron microscope. *Microscopy and Microanalysis*, 13:233-244, 2007.

FURLANI, P. R.; CLARK, R. B. Screening sorghum for aluminium tolerance in nutrient solutions. *Agronomy Journal*, 73:587-594, 1981.

GOLDBACH, H. E.; A critical review on current hypotheses concerning the role of boron in higher plants: suggestions for further research and methodological requirements. *Journal of Trace and Microprobe Techniques*, 15:51-91, 1997.

GOLDBERG, S. Reactions of boron with soils. *Plant and Soil*, 193:35-48, 1997.

GOULD, K. S.; MARKHAM, K. R.; SMITH, R. H.; GORIS, J. J. Functional role of anthocyanins in the leaves of *Quintinia serrata* A. Cunn. *Journal of Experimental Botany*, 51:1107-1115, 2000.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. The water culture method for growing without soil. *Calif. Agr. Exp., Circular*, 1950.

HORST, W. J.; KOLLMEIER, M.; SCHMOHL, N.; SIVAGURU, M.; WANG, Y.; FELLE, H. H.; HEDRICH, R.; SCHRÖDER, W.; STAB, A. Significance of the root apoplast for aluminium toxicity and resistance of maize. In: SATTERMACHER, B.; HORST, W. J. (eds). *The apoplast of higher plants: compartment of storage, transport and reactions*. Springer: Dordrecht. p. 49-66, 2007.

HOSSAIN, A. K. M. Z.; HOSSAIN, M. A.; KOYAMA, H.; HARA, T. Effects of aluminum and boron supply on growth of seedlings among 15 cultivars of wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in Bangladesh. *Soil Science & Plant Nutrition*, 50:189-195, 2004.

HURTADO, S. M. C.; RESENDE, A. V.; SILVA, C. A.; CORAZZA, E. J.; SHIRATSUCHI, L. S. Clorofilômetro no ajuste da adubação nitrogenada em cobertura para o milho de alta produtividade. *Ciência Rural*, 41:1011-1017, 2011.

JIANG, H. X.; TANG, N.; ZHENG, J. G.; CHEN, L. S. Antagonistic actions of boron against inhibitory effects of aluminum toxicity on growth, CO₂ assimilation, ribulo-1,5-biphosphate carboxylase/oxygenase, and photosynthetic electron transport probed by the JIP-teste, of *Citrus grandis* seedlings. *BioMed Central Plant Biology*, 9:102, 2009.

JONES, D. L.; BLANCAFLOR, E. B.; KOCHIAN, L. V.; GILROY, S. Spatial coordination of aluminium uptake, production of reactive oxygen species, callose production and wall rigidification in maize roots. *Plant, Cell and Environmental*, 29:1309-1318, 2006.

LENHARD, N. R.; SCALON, S. P. Q.; NOVELINO, J. O. Crescimento inicial de mudas de pau ferro (*Caesalpinia ferrea* Mart. Ex Tul. var. *leiostachya* Benth.) sob diferentes regimes hídricos. *Ciência e Agrotecnologia*, 34:870-877, 2010.

LENOBLE, M. E.; BLEVINS, D. G.; MILES, R. J. Prevention of aluminum toxicity with supplemental boron. I. Maintenance of root elongation and cellular structure. *Plant, Cell and Environment*, 19:1132-1142, 1996a.

LENOBLE, M. E.; BLEVINS, D. G.; MILES, R. J. Prevention of aluminum toxicity with supplemental boron. II. Stimulation of root growth in acidic, high aluminum subsoil. *Plant, Cell and Environment*, 19:1143-1148, 1996b.

LICHTENTHALER, H.; WELLBURN, A. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 603:591-592, 1983.

LOOMIS, W. D.; DURST, R. W. Chemistry and biology of boron. *BioFactors*, 3:229-239, 1992.

LUKASZEWSKI, K. M.; BLEVINS, D. G. Root growth inhibition in boron-deficient or aluminum-stressed squash may be a result of impaired ascorbate metabolism. *Plant Physiology*, 112:1135-1140, 1996.

KARCHER, D. E.; RICHARDSON, M. D. Quantifying turfgrass color using digital image analysis. *Crop Science*, 43:943-951, 2003.

KELTJENS, W. G. Magnesium uptake by Al-stressed maize plants with special emphasis on cation interactions at root exchange sites. *Plant and Soil* 171:141-146, 1995.

KOLLMEIR, M.; FELLE, H. H.; HORST, W. J. Genotypical differences in aluminum resistance of maize are expressed in the distal part of the transition zone. Is reduced basipetal auxin flow involved in inhibition of root elongation by aluminum?. *Plant Physiology*, 122:945-956, 2000.

MEYCHIK, N. R.; YERMAKOV, I. P. A new to the investigation on the tonogenic groups of root cell walls. *Plant and Soil*, 217:257-264, 1999.

MEYCHIK, N. R.; YERMAKOV, I. P. Ion exchange properties of plant root cell walls. *Plant and Soil*, 234:181-193, 2001.

MEYCHIK, N. R.; NIKOLAEVA, J. I.; YERMAKOV, I. P. Ion exchange properties of the cell walls isolated from the halophyte plants (*Suaeda altissima* L.) grown under conditions of different salinity. *Plant and Soil*, 277:163-174, 2005.

MENDONÇA, R. J.; CAMBRAIA, J.; OLIVEIRA, J. A.; OLIVA, M. A. Efeito do alumínio na absorção e na utilização de macronutrientes em duas cultivares de arroz. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38:843-848, 2003.

MORAES-DALLAQUA, M. A.; BELTRATI, C. M.; RODRIGUES, J. D. Anatomia de ápices radiculares de feijão cv. Carioca submetidos a níveis de boro em solução nutritiva. *Scientia Agricola*, 57:425-430, 2000.

MOTTA, A. C. V.; SERRAT, B. M.; REISSMANN, C. B.; DIONÍSIO, J. A. Micronutrientes na rocha, no solo e na planta. Curitiba: Edição dos autores. Universidade Federal do Paraná. 2007. 246 p.

MOTTA, A. C. V.; MELO, V. F. Química dos solos ácidos. In: MELO, V. F. & ALLEONI, L. R. F. eds. *Química e mineralogia do solo*, n. 2. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2009. p. 313-380.

MURRAY, J. R.; HACKETT, W. P. Difydroflavonol reductase activity in relation to differential anthocyanin accumulation in juvenile and mature phase *Hedera helix* L. *Plant Physiology*, 97:343-351, 1991.

NETTO, A. T.; CAMPOSTRINI, E.; OLIVEIRA, J. G.; YAMANISHI, K. Portable chlorophyll meter for quantification of photosynthetic pigments, nitrogen and the possible use for assessment of the photochemical process in *Carica papaya* L. *Brazilian Journal Plant Physiology*, 14:203-210, 2002.

ORTUZAR-IRAGORRI, M. A.; ALONSO, A.; CASTELLÓN, A.; BESGA, G.; ESTAVILLO, J. M.; AIZPURUA, A. N-tester use in soft winter wheat: evaluation of nitrogen status and grain yield prediction. *Agronomy Journal*, 97:1380-1389, 2005.

PERREIRA, J. M.; CAMBRAIA, J.; FONSECA JÚNIOR, E. M.; RIBEIRO, C. Efeito do alumínio sobre a absorção, o acúmulo e o fracionamento do fósforo em sorgo. *Bragantia*, 67:961-967, 2008.

PURCINO, A. A. C.; ALVES, V. M. C.; PARENTONI, S. N.; BELETE, C. L.; LOGUERCIO, L. L. Aluminum effects nitrogen uptake and nitrogen assimilating enzymes in maize genotypes with contrasting tolerance to aluminum toxicity. *Journal of Plant Nutrition*, 26:31-61, 2003.

- RADMER, L.; TESFAYE, M.; SOMERS, D. A.; TEMPLE, S. J.; VANCE, C. P.; SAMAC, D. A. Aluminum resistance mechanism in oat (*Avena sativa* L.) Plant Soil, 351:121-134, 2012.
- RICE-EVANS, C. A.; MILLER, N. J.; PAGANGA, G. Antioxidant properties of phenolic compounds. Trends in Plant Science, 2:152-159, 1997.
- RUIZ, J. M.; RIVERO, R. M.; ROMERO, L. Boron increases synthesis of glutathione in sunflower plants subjected to aluminum stress. Plant and Soil, 279:25-30, 2006.
- SILVA, I. R.; SMYTH, T.; MOXLEY, D.; CARTER, T.; ALLEN, N.; RUFTY, T. Aluminum accumulation at nuclei of cells in the root tip. Fluorescence detection using lumogallion and confocal laser scanning microscopy. Plant Physiology, 123:543-552, 2000.
- SILVA, I. R.; CORRÊA, T. F. C.; NOVAIS, R. F.; GEBRIM, F. O.; NUNES, F. N.; SILVA, E. F.; SMYTH, T. J. Protective effect of divalent cations against aluminum toxicity in soybean. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32:2061-2071, 2008.
- SILVA, I. R.; CORRÊA, T. F. C.; NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; RUFTY, T.; SILVA, E. F.; GEBRIM, F. O.; NUNES, F. N. Timing, location and crop species influence the magnitude of amelioration of aluminum toxicity by magnesium. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 33:65-76, 2009.
- SILVA, S.; PINTO, G.; DIAS, M. C.; CORREIA, C. M.; MOUTINHO-PEREIRA, J.; PINTO-CARNIDE, O.; SANTOS, C. Aluminium long-term stress differently affects photosynthesis in rye genotypes. Plant Physiology and Biochemistry, 54:105-112, 2012.
- SIVAGURU, M.; HORST, W. J. The distal part of the transition zone is the most aluminum-sensitive apical root zone of maize. Plant Physiology, 116:155-163, 1998.
- SOMMER, A. L.; SOROKIN, H. Effects of the absence of boron and of some other essential elements on the cell and tissue structure of the roots tips of *Pisum sativum*. Plant Physiology, 3:237-260, 1928.
- STASS, A.; KOTUR, Z.; HORST, W. J. Effect of boron on the expression of aluminium toxicity in *Phaseolus vulgaris*. Physiologia Plantarum, 131:283-290, 2007.
- SHORROKS, V. M. The occurrence and correction of boron deficiency. Plant Soil, 193:121-148, 1997.

TABUCHI, A.; MATSUMOTO, H. Changes in cell-wall properties of wheat (*Triticum aestivum*) roots during aluminum-induced growth inhibition. *Plant Physiology*, 112:353-358, 2001.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Plant Physiology*. 3. ed. Sunderland: Sinauer Associates Publishers. 2002, 624 p.

TANG, N.; JIANG, H. X.; YANG, L. T.; LI, Q.; YANG, G. H.; CHEN, L. S. Boron-aluminum interactions affect organic acid metabolism more in leaves than in roots of *Citrus grandis* seedlings. *Biologia Plantarum*, 55:681-688, 2011.

TEIXEIRA, I. R.; BORÉM, A.; ANDRADE, M. J. B.; GIÚDICE, P.; CECON, P. R. Teores de clorofila em plantas de feijoeiros influenciadas pela adubação com manganês e zinco. *Acta Scientiarum*, 26:147-152, 2004.

VALLE, S. R.; CARRASCO, J.; PINOCHET, D.; CALDERINI, D. F. Grain yield, above-ground and root biomass of Al-tolerant and Al-sensitive wheat cultivars under different soil aluminum concentrations at field conditions. *Plant and Soil*, 318:299-310, 2009.

WANG, J. J.; EVANGELOU, B. P.; ASHRAF, M. M. Changes in root cell wall chemistry induced by manganese exposure with two tobacco genotypes. *Journal of Plant Nutrition*, 26:1527-1540, 2003.

WANG, Q.; LU, L.; WU, X.; LI, Y.; L, J. Boron influences pollen germination and pollen tube growth in *Picea meyeri*. *Tree Physiology*, 23:345-351, 2003.

WEHR, J. H.; BLAMEY, F. P. C.; MENZIES, N. W. Comparison between methods using copper, lanthanum, and colorimetry for the determination of the cation exchange capacity of plant cell walls. *Journal of Agricultural and Chemistry*, 58:4554-4559, 2010.

WHITE, P. J. Ion uptake mechanisms of individual cells and roots: short-distance transport. In: MARSCHNER, P. (ed.). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. Ed. 3. Elsevier, 2012, p. 7-47.

WINTHROP, B. P.; JAMES, E. S.; Anthocyanins in basil (*Ocimum basilicum* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46:5165-5170, 1998.

WOJCIK, P. Impact of boron on biomass production and nutrition of aluminum-stressed apple rootstocks. *Journal of Plant Nutrition*, 26:2439-2451, 2003.

WU, Y.; HENDERSHOT, W. H. Cation exchange capacity and proton binding properties of pea (*Pisum sativum* L.) roots. *Water, Air and Soil Pollution*, 200:353-369, 2009.

YAMAMOTO, Y.; KOBAYASHI, Y.; DEVI, S. R.; RIKIISHI, S.; MATSUMOTO, H. Aluminum toxicity is associated with mitochondrial dysfunction and the production of reactive oxygen species in plant cells. *Plant Physiology*, 128:63-72, 2002.

YANG, Y. H.; GU, H. J.; FAN, W. Y.; ABDULLAHI, A. Effects of boron on aluminum toxicity on seedlings of two soybean cultivars. *Water, Air and Soil Pollution*, 154:239-248, 2004.

YU, M.; SHEN, R.; XIAO, H.; XU, M.; WANG, H.; WANG, H.; ZENG, Q.; BIAN, J. Boron alleviates aluminum toxicity in pea (*Pisum sativum*). *Plant Soil*, 314:87-98, 2009.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para avaliação da interação B/Al, seja em condições de cultivo utilizando solo como substrato, seja em sistema hidropônico, a comparação entre espécies de diferentes famílias seria salutar. Sob esse prisma, investigar a relação entre acúmulo de Al na raiz e o transporte/acúmulo na parte aérea das plantas.

A análise de CTC radicular demonstrou variável importância sobre a aquisição de nutrientes, dependendo da condição vigente. Sendo que novos estudos devem contemplar outros aspectos nutricionais que afetam tal característica.

Tendo em vista que a CTC radicular foi afetada pelos elementos B e Al, pelo conjunto das considerações anteriores (acúmulo/transporte Al e CTC), é intrínseco o estudo do aparato de troca catiônica em diferentes partes da raiz e, além disso, no caule e em folhas.

ANEXO 1

Atributos do sistema radicular de trigo cultivado em solo com condições de acidez e doses de B

Boro mg dm ⁻³	Baixa acidez	Alta acidez	Gessagem
Comprimento radicular (cm planta ⁻¹)			
0	1082 Aa	1054 Aa	908 Ab
0,15	1003 Ba	1284 ABa	1439 Aa
0,40	1120 Aa	1299 Aa	1277 Aab
1,25	1196 Aa	1106 Aa	1237 Aab
3,50	1165 Aa	1204 Aa	993 Ab
Área superficial radicular (cm ² planta ⁻¹)			
0	239 Aa	192 Aa	179 Ab
0,15	231 Aa	242 Aa	269 Aa
0,40	258 Aa	250 Aa	250 Aab
1,25	282 Aa	211 Aa	217 Aab
3,50	259 Aa	233 ABa	175 Bb
Volume radicular (cm ³ planta ⁻¹)			
0	7,52 Aa	4,89 Ba	4,36 Bab
0,15	7,51 Aa	6,19 Aa	6,96 Aa
0,40	8,24 Aa	6,10 Aa	6,29 Aab
1,25	9,49 Aa	5,12 Ba	4,65 Bab
3,50	9,02 Aa	5,92 Ba	4,16 Bb

Letras minúsculas (comparam doses de B) e letras maiúsculas (comparam níveis de acidez) iguais indicam ausência de significância pelo teste de Tukey (p < 0,05).